

10/502503  
5  
PCT/AT 03/00018



**ÖSTERREICHISCHES PATENTAMT**

A-1014 WIEN, KOHLMARKT 8 - 10

REC'D 20 FEB 2003

WIPO

PCT

Schriftengebühr € 195,00

**BEST AVAILABLE COPY**

Aktenzeichen A 124/2002

Das Österreichische Patentamt bestätigt, dass

**O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Erich GORNIK**  
in A-1040 Wien, Floragasse 7,  
**Dipl.-Ing. Dr. Dionyz POGANY**  
in A-1040 Wien, Floragasse 7 und  
die **Firma Innovationsagentur Gesellschaft m.b.H.**  
in A-1020 Wien, Taborstraße 10,

am **25. Jänner 2002** eine Patentanmeldung betreffend

**"Verfahren und Einrichtung zum optischen Testen von  
Halbleiterbauelementen",**

überreicht hat und dass die beigeheftete Beschreibung samt Zeichnungen  
mit der ursprünglichen, zugleich mit dieser Patentanmeldung überreichten  
Beschreibung samt Zeichnungen übereinstimmt.

Österreichisches Patentamt

Wien, am 27. Jänner 2003

Der Präsident:

i. A.



**K. BRINŽAK**

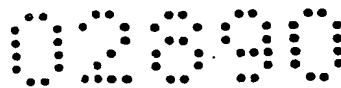


**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

ÖSTERREICHISCHES PATENTAMT  
Verwaltungsstellen-Direktion

€ 55,- *Handl*  
Kanzleigegebühr bezahlt.

A 124/2002



Urtext

R 39009

51 Int. Cl.:

AT PATENTSCHRIFT

11 Nr.

(73) Patentinhaber:

GORNIK Erich, O. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.  
Wien (AT)

POGANY Dionyz, Dipl.-Ing. Dr.  
Wien (AT)

Innovationsagentur Gesellschaft m.b.H.  
Wien (AT)

(54) Gegenstand:

Verfahren und Einrichtung zum optischen Testen von  
Halbleiterbauelementen

(61) Zusatz zu Patent Nr.

(66) Umwandlung aus GM

(62) Ausscheidung aus:

(22) (21) Angemeldet am:

25. JAN. 2002

(30) Priorität:

(42) Beginn der Patentdauer:

Längste mögliche Dauer:

(45) Ausgegeben am:

(72) Erfinder:

(60) Abhängigkeit:

(56) Entgegenhaltungen, die für die Beurteilung der Patentierbarkeit in Betracht  
gezogen wurden:

1/16



- 1 -

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen bestimmter Dicke unter Verwendung eines optischen Interferenz-Systems mit zumindest einer Lichtquelle zur Aussendung eines monochromatischen Lichtstrahls mit einer Wellenlänge, für welche das Material des Halbleiterbauelements zumindest teilweise transparent ist, wobei der Lichtstrahl in einen Referenzstrahl und einen Probenstrahl aufgetrennt wird, der Probenstrahl auf das Halbleiterbauelement gerichtet wird und mit Hilfe eines Detektionssystems die durch Interferenz des vom Halbleiterbauelement reflektierten Lichtstrahls mit dem Referenzstrahl erzeugten Bildes zur zweidimensionalen Darstellung bestimmter interner physikalischer Eigenschaften des Halbleiterbauelements aufgenommen werden.

Die Erfindung betrifft weiters eine Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen bestimmter Dicke mit zumindest einer Lichtquelle zur Aussendung eines monochromatischen Lichtstrahls mit einer Wellenlänge, für welche das Material des Halbleiterbauelements zumindest teilweise transparent ist und mit einem Strahlteiler zum Auftrennen des Lichtstrahls in einen Referenzstrahl und einen Probenstrahl und mit zumindest einem Detektionssystem zum Aufnehmen der durch Interferenz des vom Halbleiterbauelement reflektierten Lichtstrahls mit dem Referenzstrahl erzeugten zweidimensionalen Bilder.

Die Erfindung betrifft den Bereich des optischen Testens von Halbleiterbauelementen und integrierten Halbleiterschaltkreisen (Integrated Circuits, IC) in der Mikroelektronikindustrie. Derartige Tests von Halbleiterbauelementen werden beispielsweise in der Qualitätskontrolle für Routineinspektionen zur Untersuchung interner Bauelemente-Parameter, z.B. der Temperaturverteilung oder der Verteilung der freien Ladungsträger während externer Belastungen, beispielsweise mit Hochstromimpulsen bei Schutzstrukturen gegen elektrostatische Entladungen (ESD) oder in Leistungsbaulementen aber auch in optoelektronischen Bauelementen etc., eingesetzt. Ebenso können derartige Verfahren bei der Fehleranalyse zum Auffinden lokaler Ströme und lokaler Schäden in Halbleiterbauelementen und in jeder Art von Materialien, in denen sich lokale physikalische Größen zeitabhängig ändern und die eine Auswirkung in den lokalen optischen Größen haben, verwendet werden.

Die Untersuchung interner physikalischer Parameter, wie zum

Beispiel der Temperatur, der thermischen Energie, der Dichte der freien Ladungsträger, des elektrischen Feldes, ist von wesentlichem Interesse für das Verständnis der Funktion von Halbleiterbauelementen. Speziell in Schutzstrukturen gegen elektrostatische Ladung (ESD) und in Leistungselementen ist die Selbsterwärmung die Hauptursache für den Ausfall der Bauelemente, weshalb das Lokalisieren von Schwachstellen und das Verständnis der Ausfallmechanismen von primärem Interesse sind. Während der Entwicklungsphase eines Halbleiterbauelements oder eines integrierten Schaltkreises werden zur Vorhersage der Funktionalität und zum Abschätzen der Zuverlässigkeit normalerweise Simulationsprogramme und intensive Tests, basierend auf zerstörender Fehleranalyse, verwendet. Aufgrund unpräziser Simulationsmodelle für den Bereich hoher Ströme und hoher Temperaturen, wie sie zum Beispiel während der ESD Belastung in ESD Schutzstrukturen auftreten, können die verwendeten Simulationsprogramme die unter solchen Bedingungen auftretende Dynamik und die Verteilung der internen physikalischen Parameter nicht korrekt voraussagen. Auf der anderen Seite ist die zerstörende Prüfung der Bauelemente zeitaufwendig und auch teuer, da eine große Anzahl von Bauelementen verbraucht werden muss. Daher ist eine Messung der internen physikalischen Bauelemente-Parameter mit einer schnellen, nicht invasiven und einfachen Methode wichtig.

Für die Leistungsüberprüfung, die Verifikation von Simulationsergebnissen und für Fehleranalysen in Halbleiterbauelementen unter verschiedenen Arten der Anregung wurden optische Methoden entwickelt. Es ist in vielen Fällen von großem Interesse, die physikalischen Parameter während eines einzigen Belastungsimpulses zu messen, um die Testzeit zu verkürzen aber auch um nicht wiederholbare Phänomene zu untersuchen. Mit Belastungsimpuls ist in diesem Fall jede Art der Anregung des Halbleiterbauelements gemeint, bei der sich die physikalischen Parameter ändern.

Um die Änderungen der internen physikalischen Parameter optisch im Volumen ("bulk") zu messen, werden Halbleiterbauelemente gewöhnlich von der Chiprückseite oder lateral untersucht. Da in vielen Fällen der optische Zugang von der Chipvorderseite nicht möglich ist (beispielsweise aufgrund von sogenannten "flip-chip"-Gehäusen und vieler komplexer Verdrahtungsebenen), ist der Zugang von der Chiprückseite unumgänglich. Für die Messung von wiederkehrenden Signalverläufen an den Knoten von IC's mit GHz Band-

breite wurde eine große Anzahl von verschiedenen, nicht invasiven Infrarot-Lasersonden-Techniken entwickelt, die auf der Messung der Änderung des Brechungsindex oder der Absorption mit der Änderung in der Dichte der freien Ladungsträger (plasma-optischer Effekt), der Temperatur (thermo-optischer Effekt) oder des elektrischen Feldes (elektro-optischer Effekt) basieren. Unter diesen werden interferometrische Rückseiten-Techniken verwendet, wobei ein Infrarot-Laserstrahl mit einer Wellenlänge  $\lambda=1,3\mu\text{m}$  (der in Si nicht absorbiert wird) von der Chiprückseite her in das aktive Gebiet (z.B. Kanal, Emitter etc.) der Bauelemente fokussiert. Derartige Verfahren wurden erfolgreich in CMOS und BiCMOS Bauelementen eingesetzt (siehe: H.K. Heinrich et al.: Noninvasive sheet charge density probe for integrated silicon devices, Appl. Phys. Lett. vol.48, 1986, pp.1066-1068; M. Goldstein et al.: Heterodyne interferometer for the detection of electric and thermal signals in integrated circuits through the substrate, Rev. Sci. Instrum., vol. 64 (1993), pp.3009-3013; G. N. Koskovich et al.: Voltage Measurement in GaAs Schottky barrier using optical phase modulation, IEEE Electron. Dev.Lett vol.9, 1988, pp.433-435). Weiters wurde eine Lasersonden-Technik ( $\lambda=1,3\mu\text{m}$ ) verwendet, um die Temperaturdynamik und die Dynamik freier Ladungsträger in Leistungsbauelementen mit einer Ortsauflösung von  $2\mu\text{m}$  und einer Zeitauflösung von  $1\mu\text{s}$  zu messen (siehe: N. Seliger et al.: Time resolved analysis of self-heating in power VDMOSFETs using back-side laserprobing, Solid St. Electron., vol.41, 1997, pp.1285-1292).

Kürzlich wurde eine Methode zur Aufnahme der zweidimensionalen Temperatur- und Ladungsträgerdichteverteilung vorgestellt ( $\lambda=1,3\mu\text{m}$ ), welche zur Analyse des Bauelementeverhaltens während einzelner Hochstromimpulse geeignet ist (siehe: C. Fürböck et al., Interferometric temperature mapping during ESD and failure analysis of smart power technology ESD protection devices, J. Electrostat., vol.49, 2000, pp. 195-213). Diese Methode basiert auf einer interferometrischen Rückseiten-Lasersondentechnik, mit welcher die Temperatur-induzierte oder Ladungsträgerdichte-induzierte Phasenverschiebung in einem fokussierten, nicht-absorbierten Laserstrahl gemessen wird. Die zweidimensionale Abbildung der thermischen Energie und der Ladungsträgerdichte werden durch schrittweises, laterales Abtasten der Bauelementfläche erzielt. Die Stress-induzierte Phasenverschiebung ist proportional der

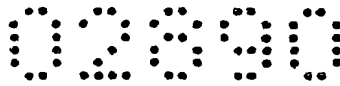
Summe der Integrale der Temperatur- und Ladungsträgerdichteänderungen längs des Laserstrahlweges. Die Zeitauflösung ist besser als 10ns und die Ortsauflösung, bestimmt durch die Laserwellenlänge, ist ungefähr 1.5µm. In erster Näherung kann die Variation der optischen Phase im Laserstrahl als Änderung der optischen Weglänge hervorgerufen durch eine Änderung der Temperatur und der Elektron- und Löcherdichte zum Zeitpunkt  $t$  (dargestellt durch  $T(x,y,z,t)$ ,  $c_n(x,y,z,t)$ ,  $c_p(x,y,z,t)$ ) bezogen auf Zeitpunkt  $t_0$  (dargestellt durch  $T_0$ ,  $c_n(x,y,z,t_0)$ ,  $c_p(x,y,z,t_0)$ , Gleichgewichtszustand, z.B. Umgebungstemperatur ohne Belastung des Bauelements) beschrieben werden:

$$\Delta\varphi(t) = 2 \cdot 2 \frac{\pi}{\lambda} \int \Delta n(T, c_n, c_p) dz \quad (1a)$$

wobei

$$\Delta n(T, c_n, c_p) = n(T, c_n, c_p) \Big|_t - n(T, c_n, c_p) \Big|_{t_0} \quad (1b)$$

wobei  $n(T, c_n, c_p) \Big|_t$  und  $n(T, c_n, c_p) \Big|_{t_0}$  der Brechungsindex des Halbleitermaterials zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t_0$  ist, und die Integration längs des Laserstrahlweges ( $z$ -Achse, der Laserstrahl ist normal auf die Chipoberfläche, die  $x$  und  $y$  Achsen bilden die laterale Ebene) durchgeführt wird. Der Faktor 2 auf der rechten Seite der Gleichung (1a) erklärt sich aus dem zweimaligen Durchgang des Laserstrahls durch das Halbleitersubstrat. Diese Gleichung für die Phasenverschiebung ist nur dann gültig, wenn Mehrfachreflexionen zwischen der Chipvorderseite und der polierten Rückseite vernachlässigt werden können. In der Praxis kann das durch das Aufbringen einer Antireflexionsschicht auf der Chiprückseite oder durch die Verwendung eines Mikroskopobjektivs mit hoher numerischer Apertur und eines Raumfilters erzielt werden. Die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Temperatur und der Ladungsträgerdichte kann in der Literatur gefunden werden (McCaulley et al. Phys Rev.B, 49 (1994), pp.7408-7417), Soref et al., IEEE J. Quant Electron, 23 (1987), pp.123-129)). Die Änderung des Brechungsindex mit dem elektrischen Feld wird vernachlässigt. In Silizium hängt der Brechungsindex nicht vom elektrischen Feld ab (centro-symmetrischer Halbleiter) und die Temperatur- und Ladungsträgereffekte dominieren. Weiters wird die Wirkung der thermischen Expansion auf die Phasenverschiebung vernachlässigt, da die Auswirkung auf die Änderung in der opti-



schen Weglänge gewöhnlich zwei Größenordnungen kleiner ist als die der Temperaturänderung und der Ladungsträgerdichteänderung (in Halbleitern wie Si und GaAs).

Die Messung der Temperatur- und Ladungsträgerverteilung über die Phasenverschiebung eignet sich für eine quantitative Analyse dieser Parameter, da der Brechungsindex fast linear von Temperatur und Ladungsträgerdichte abhängt. Die beiden Beiträge zur Phasenverschiebung können anhand ihres Vorzeichens unterschieden werden, da der Temperaturbeitrag und der Ladungsträgerbeitrag unterschiedliches Vorzeichen haben. In den Fällen, in denen der Temperaturbeitrag dominiert, ist die Temperatur-induzierte Phasenverschiebung in erster Näherung proportional der thermischen Energie im vom Laserstrahl erfüllten Volumen. Daher ist die Bestimmung der Phasenverschiebung tatsächlich ein Maß für die Energiedichte. Die laterale Auflösung für die Abbildung zweier Wärmequellen ist durch die thermische Diffusionslänge bestimmt und ist in Silizium z.B. für einen 100ns langen Stressimpuls ca.  $3\mu\text{m}$  ( $L_{\text{th}} = 3\mu\text{m} \cdot \sqrt{t/100\text{ns}}$ , wobei  $t$  die Länge des Stressimpulses ist). Dies zeigt, dass es durch die Abbildung der Energiedichte bei kurzen Stressimpulsen möglich wird, Wärmequellen innerhalb der thermischen Diffusionslänge zu lokalisieren. Bei Ansteuerung mit längeren Stressimpulsen oder mit Gleichstrom kommt es zu einer starken Verbreiterung der Temperaturverteilung und damit zu einer Verringerung des thermischen Auflösungsvermögens.

Repetitive elektrische Signale in ICs wurden ebenfalls mit einer Laserstrahlsonde ( $\lambda=1064\text{nm}$ ) von der Substratrückseite her gemessen, wobei die Modulation der Laserstrahlintensität durch die Variation der Elektro-Absorption mit der elektrischen Ansteuerung des Bauelements verursacht wird (S. Kasapi et al.: Laser beam backside probing of CMOS integrated circuits, Microel. Reliab. vol.39 (1999), pp. 957-961; M. Paniccia et al.: Optical probing of flip chip packaged microprocessors, J. Vac. Sci. technol., B, vol.16, 1998, pp.3625-3630). Basierend auf diesem Prinzip wurde von der Firma Schlumberger ein kommerzielles Gerät (IDS2000) zur Rückseiten-Messung von repetitiven elektrischen Signalen mit der Zeitauflösung von Pikosekunden an Knotenpunkten in integrierten Schaltkreisen entwickelt und vermarktet. Wegen der geringen Sensitivität der Methode muss das Messsignal über einen langen Zeitraum (Minuten) gemittelt werden und das Bauelement oftmalig wiederholten Stressimpulsen ausgesetzt werden.



In erster Näherung kann die relative Intensitätsänderung  $\Delta I/I$ , die im reflektierten Laserstrahl durch die Änderung der Absorption (verursacht durch die Änderung der Temperatur, der Elektronen- oder Löcherdichte) vom Zeitpunkt  $t_0$  bis zum Zeitpunkt  $t$  auftritt, durch:

$$\frac{(\Delta I)}{I} = \left\{ \exp \left[ -2 \cdot \int \alpha(T, c_n, c_p) \Big|_{t_0} dz \right] - \exp \left[ -2 \cdot \int \alpha(T, c_n, c_p) \Big|_t dz \right] \right\} \quad (2)$$

beschrieben werden, wobei  $\alpha(T, c_n, c_p) \Big|_t$  und  $\alpha(T, c_n, c_p) \Big|_{t_0}$  die Absorptionskoeffizienten zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t_0$  sind.  $I$  ist die konstante Lichtintensität, die von der Reflektivität des Bauelements abhängt. Aufgrund des exponentiellen Terms in Gleichung 2 ist die relative Intensitätsänderung  $\Delta I/I$  bei großen Werten der Temperatur oder Ladungsträgerdichte nicht empfindlich auf Variationen in diesen Parametern. Daher ist die Messung der Absorption für eine quantitative Analyse des internen Bauelementeverhaltens ungeeignet. Andererseits ist die Messung relativ einfach durchzuführen. Zur Steigerung der Empfindlichkeit des Instrumentes für die Inspektion von Spannungspulsen an Bauelemente-Knoten in ICs wurde von der Firma Schlumberger das Gerät IDS2500 entwickelt, das auf einem Michelson Interferometer beruht und den Brechungsindex mit Hilfe eines fokussierten Laserstrahls erfasst. Dabei ist diese Methode auf die Fehleranalyse von Schaltkreisen ausgerichtet und braucht dazu eine hohe Wiederholfrequenz der Pulse.

Die Änderungen der Temperatur und der Ladungsträgerdichte während Stromimpulsen in Halbleiterbauelementen wurden auch mit der sogenannten "Mirage" Technik untersucht, bei der eine Laserstrahlsonde das Bauelement von einer Seite durchdringt (G. Deboy et al.: Absolute measurements of transient carrier concentration and temperature gradients in power semiconductor devices by internal IR-laser deflection, Microel. Eng., vol. 31, 1996, pp. 299-307). Die Ablenkung des Laserstrahls aufgrund des temperatur- oder Ladungsträger-induzierten Brechungsindexgradienten im Bauelement wird gemessen. Die Verteilung der Temperatur und der Ladungsträgerdichte wird durch Abtasten des Bauelements abgebildet.

R. A. Sunshine et al. ("Stroboscopic investigation of thermal switching in an avalanching diode", Appl. Phys Lett. vol.18, 1971, pp. 468-470.) und W. B. Smith et al. ("Second breakdown and

damage in junction devices", IEEE Tr. ED, vol.20, 1973, pp.731-744) berichten von einer stroboskopischen Methode zur Messung des Temperaturanstiegs und von Stromfilamenten während des Lawindurchbruchs in semitransparenten Dünnschichttransistoren, die auf einem Saphirsubstrat präpariert wurden. Die räumliche Temperaturverteilung im Bauelement während der Belastung mit einem Stromimpuls wurde über die Beobachtung der Absorptionsänderung im Bauelement gemessen. Das Bauelement wird mit einer Frequenz von ca. 20Hz belastet (resultierend in einer entsprechenden Erwärmung) und mit der selben Frequenz belichtet. Für die Belichtung wird eine breitbandige, weiße Lichtquelle (beispielsweise eine Xenon Blitzlampe) verwendet. Die Belichtungszeit (20ns) ist wesentlich kürzer als die Dauer des Stromimpulses ( $>>10\mu s$ ). Das Transmissions-Bild des Bauelements konnte aufgrund des langen Nachleuchtens des Kathodenmaterials mit einer Vidicon-Kamera aufgezeichnet werden. Durch Variieren der Verzögerungszeit zwischen dem Stromimpuls und der Belichtung konnten Bilder zu verschiedenen Zeitenfenstern aufgenommen werden. Diese Methode wurde für Transmissionsaufnahmen entwickelt und ist auf Bauelemente beschränkt, die für sichtbares Licht transparent sind. Die Methode kann deshalb nicht für die Abbildung von Bauelementen auf Halbleitersubstrat eingesetzt werden, wo Licht im Infrarotbereich verwendet werden muss.

Die US 4 841 150 beschreibt eine Methode zur Abbildung von Temperaturverteilungen in Halbleiterbauelementen, bei der ein aufgeweiteter, reflektierter Lichtstrahl verwendet wird. Die Methode basiert auf der spektralen Analyse der Reflektivitätsänderung aufgrund der Temperatur-induzierten Änderung in der Absorption. Die Methode wurde für die Messung der Temperaturverteilung unter Gleichstrombelastung auf Waferenebene während einzelner Herstellungsprozesse entwickelt und kann nicht für zeitaufgelöste Messungen interner physikalischer Eigenschaften von einzelnen Bauelementen verwendet werden.

D.C. Hall et al. ("Interferometric near field imaging technique for phase and refractive index profiling in large-area planar-waveguide optoelectronic devices", IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron, vol.1, 1995, pp.1017-1029) beschreiben eine Methode zur Abbildung der räumlichen Änderungen im Brechungsindex in einem planaren Hohlleiter mittels Interferometrie unter Verwendung eines aufgeweiteten IR Laserstrahls ( $\lambda=910nm$ ). Es wurde

ein Mach-Zehnder Interferometer verwendet, wobei der Laserstrahl des Probenarms des Interferometers durch die Probe dringt und mit dem Laserstrahl des Referenzarms interferiert. Das Interferenzbild wird mit einer CCD (Charged Coupled Device) Kamera aufgezeichnet. Die räumliche Verteilung der Brechungsindexänderung wird durch den Vergleich der aus den Interferenzbildern extrahierten Phasenverteilung, im erwärmten und nicht erwärmten Fall, erzielt. Auch diese Methode arbeitet mit Lichttransmission durch das Bauelement und ist nicht geeignet, Halbleiterbauelemente in einem Wafer zu untersuchen.

Methoden und Apparate für die berührungslose Messung der Substrattemperatur basierend auf Laserinterferometrie werden in der US 5 229 303 und der US 5 773 316 beschrieben. Die Temperaturmessung bei diesen Methoden wird durch die Messung der Änderung in der Intensität eines reflektierten oder transmittierten Lichtstrahls, der auf ein Halbleitersubstrat auftrifft, bewerkstelligt. Dies wird durch die Änderung der optischen Weglänge aufgrund der Temperatur-induzierten Änderung im Brechungsindex verursacht. Der Lichtstrahl erfährt im Substrat mehrfache Reflexionen, was zur Ausbildung von Interferenzmaxima und -minima führt, aus welchen die Temperatur abgeleitet werden kann. Durch die Verwendung eines leicht gekippten Substrats oder von zwei verschiedenen Laserwellenlängen kann das Vorzeichen der Temperaturänderung durch die Messung der Bewegungsrichtung der Interferenzstreifen oder durch die Messung der Richtung der Intensitätsänderung in zwei Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge gewonnen werden. Bei dieser Methode werden die Interferenzstreifen durch die Interferenz innerhalb des Substrats erzeugt. Diese Methode eignet sich nicht für die Messung der Temperatur in Halbleiterbauelementen, da die Mehrfachreflexionen innerhalb des Bauelements ein störender Faktor sind, die eine quantitative Analyse unmöglich machen.

In der US 6 181 416 wird eine Methode und ein Apparat für die Abbildung der Temperatur und der Ladungsträgerdichte in Halbleiterbauelementen beschrieben, welche auf der sogenannten Schlieren-Methode beruht, einem Abbildungsverfahren das auf der Abbildung des Brechungsindexgradienten basiert. Der Apparat kann eine Abbildung des Bauelements auch von der Chiprückseite erzeugen, wobei die Zeitauflösung dabei von der Dauer des Laser-Belichtungsimpulses abhängig ist. Die Winkelablenkung des

Laserlichts aufgrund des Brechungsindexgradienten wird in eine Änderung der Lichtintensität im Bild des Bauelements transformiert. Durch Vergleich der Bilder die im ausgeschalteten Zustand und im eingeschalteten, aktiven Zustand des Bauelements aufgenommen werden, lassen sich die räumliche Verteilung der Temperatur- und Ladungsträgerdichteänderung innerhalb eines gewissen Zeitfensters ableiten. Die Gewinnung quantitativer Aussagen über die internen physikalischen Parameter (Temperatur, thermische Energie, Ladungsträgerkonzentration) ist mit dieser Methode allerdings schwierig. Ebenso erlaubt der Zeitablauf des Messaufbaus nicht die Auslösung des Belichtungsimpulses durch den Belastungsimpuls, welcher die Änderung der Temperatur im Bauelement oder der Konzentration der freien Ladungsträger verursacht.

Ein weiteres Prinzip der Temperaturmessung in Halbleiterbauelementen ist die Auswertung der Schwarzkörperstrahlung (I.P. Herman: Real time optical thermometry during semiconductor processing, J. Sel. Top. Quantum Electron, vol.1, 1995, pp.1047-1053). Die Ortsauflösung dieser Methode ist aufgrund der Wellenlänge im Bereich von 3-10µm limitiert. Weiters benötigt die Methode eine aufwendige Kalibrierung und es müssen Mehrfachreflexionen innerhalb des Halbleiterbauelements in Betracht gezogen werden. Verfahren zur Temperaturmessung in Halbleiterbauelementen mittels der Schwarzkörperstrahlung werden beispielsweise in der EP 0 618 455, der WO 99/28715 oder der EP 0 880 853 beschrieben.

Die Stromverteilung in einem Halbleiterbauelement kann qualitativ auch über die Messung der Lichtemission aus dem Bauelement gewonnen werden (M. Hanneman et al: "Photon emission as a tool for ESD failure localization and as a technique for studying ESD phenomena", Proc. ESREF, 1990, pp.77-83, J. Költzer et al.: "Quantitative emission microscopy", J. Appl. Phys., vol.71, 1992, pp. R23-R41). Die Emission wird durch die strahlenden Übergänge der Elektronen und Löcher und durch die Emission heißer Ladungsträger ('hot carrier emission', Bremsstrahlung, Ladungsträgerrekombination etc.) verursacht. Eine Methode zur Analyse integrierter Schaltkreise mit einer Zeitauflösung im Bereich von Pikosekunden wurde für die Rückseiten-Messung von Signalverläufen in CMOS Schaltkreisen entwickelt (M.K. McManus et al.: "PICA: Backside failure analysis of CMOS circuit using picosecond imaging circuit analysis", Microel. Reliab., vol.40, 2000, pp. 1353-

1358). Diese Methode basiert auf der stroboskopischen Abbildung der Emissionsstrahlung, die während des hochfrequenten zyklischen Schaltens der Bauelemente auftritt. Dazu werden die Aufnahmen einer CCD Kamera über einen längeren Zeitraum (Stunden) gemittelt. Ein derartiges Verfahren, welches für die Emissionsmikroskopie oder die Mikroskopie im Volumen eines integrierten Schaltkreises relevant ist, wird beispielsweise in der US 6 222 187 beschrieben.

Optische Methoden zur Fehleranalyse in integrierten Schaltkreisen von der Chipvorderseite werden beispielsweise in der US 4 682 605 und der GB 2 217 011 beschrieben. Beim fluoreszenten mikrothermischen "mapping" wird die lokale Erwärmung durch Wärmemedissipation an einer Fehler-Stelle durch eine organische Schicht, die auf die Vorderseite des ICs aufgebracht wird, angezeigt. Die Methode zeigt allerdings eine stark reduzierte Genauigkeit, wenn die Fehlerstelle tief im Substrat lokalisiert ist und/oder wenn der IC eine große Anzahl von Metallisierungsschichten aufweist. Weiters kann diese Methode nicht angewandt werden, wenn der IC in einem "flip-chip"-Gehäuse eingebaut ist.

Holographische Interferometrie wird häufig für die (auch zeitaufgelöste) Abbildung von Oberflächentopologien, Verbiegung, Änderungen im Brechungsindex oder anderen zeitabhängigen Änderungen in Objekten verwendet und auch in Interferenzmikroskopen für die Inspektion der Oberflächen von Halbleiterbauelementen eingesetzt (siehe: P.C. Montgomery et al., "Phase stepping microscopy (PSM): a qualification tool for electronic and optoelectronic devices", Semicond. Sci. Technol., vol.7, 1992, pp.A237-A242; K.Snow et al., "An Application of holography to interference microscopy", Appl. Optics, vol.7, 1968, pp. 549-554). Ein derartiges Verfahren wird beispielsweise in der US 4 818 110 beschrieben. Unter Verwendung der oben genannten Verfahren kann die Oberflächen-Topographie oder die Höhe der Oberflächenstrukturen von Halbleiterbauelementen aus der Änderung der Interferenzstreifen bestimmt werden, welche mit der Phasenänderung eines monochromatischen Lichtstrahls zusammenhängt. Ebenso kann die Höhe der Oberflächenstruktur eines Halbleiterbauelements über den Kohärenzgrad eines breitbandigen Lichtstrahls ermittelt werden. In keinem der bekannten Verfahren wird die holographische Interferometrie zur zweidimensionalen Abbildung der Brechungsindexänderungen im Inneren des Halbleitermate-

rials eines Halbleiterbauelements verwendet.

Für die zeitaufgelöste interferometrische Analyse von schwingenden Objekten wurde eine stroboskopische Methode eingesetzt (P. Shajenko et al.: "Stroboscopic holographic interferometry", Appl. Phys. Lett, vol.13, 1968, pp.44-46S, Nakadate et al.: "Vibrational measurements using phase-shifting stroboscopic holographic interferometry", Optica Acta, vol.33, 1986, pp.1295-1309). Für die Extraktion der Phase aus Interferenzstreifen wurden verschiedene Verfahren vorgeschlagen, welche beispielsweise auf Fast Fourier Transformation (FFT) und "phase unwrapping" beruhen (siehe: T. Kreis: "Digital holographic interference-phase measurements using the Fourier-transform method", J.Opt.Soc Am. A vol.3, 1986, pp.847-855; M. Takeda: "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", J. Opt. Soc. Am. vol 72, 1982, pp. 156-160).

Ein Nachteil aller abtastenden Methoden wie der Interferometrie, der Mirage-Technik und der Absorption ist die Notwendigkeit, dass das Halbleiterbauelement mehrfach wiederholten Belastungsimpulsen ausgesetzt werden muss, um eine Abbildung zu erzeugen. Dies kann durch die kumulative Belastung zu einer Zerstörung des Bauelements führen.

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher in der Schaffung eines Verfahrens zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen der angegebenen Art, welches möglichst rasch und einfach durchführbar ist, so dass das zu testende Halbleiterbauelement möglichst wenig belastet wird. Das Verfahren soll sich weiters durch besonders hohe Empfindlichkeit bezüglich der Änderungen bestimmter physikalischer Eigenschaften innerhalb des Halbleiterbauelements auszeichnen. Nachteile bekannter Verfahren sollen vermieden oder reduziert werden.

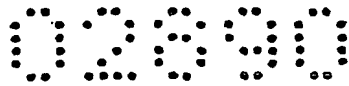
Gelöst wird die erfindungsgemäße Aufgabe dadurch, dass der Probenstrahl auf die Rückseite des zu testenden Halbleiterbauelements gerichtet wird und an dessen Vorderseite reflektiert wird, und dass zumindest zwei Interferenzbilder unter unterschiedlichen Belastungszuständen des Halbleiterbauelements zeitlich hintereinander detektiert werden.

Durch die Untersuchung des Bauelements von der Substratrückseite her, ist das Testen auch von Halbleiterbauelementen, bei denen der optische Zugang von der Vorderseite nicht möglich ist, zulässig. Das optische Interferenzsystem kann beispielsweise

durch einen Michelson Interferometer realisiert sein. Der Probenstrahl durchleuchtet das Halbleiterbauelement, wird von der Vorderseite des Bauelements reflektiert und geht wieder durch das Bauelement zurück in Richtung des Strahlteilers. Der reflektierte Strahl enthält nun Informationen über die Änderung des Brechungsindex innerhalb des Halbleiterbauelements und über die Änderung der Reflektivität der Vorderseite des Halbleiterbauelements. Durch die Interferenz des Probenstrahls mit dem Referenzstrahl, welcher durch Reflexion an einem Spiegel oder an einem mit dem zu testenden Halbleiterbauelement identischen Halbleiterbauelement erzeugt wurde, wird ein Interferenzbild erzeugt, welches mit einem geeigneten Detektionssystem aufgenommen wird. Aus dem Interferenzbild kann das Phasenprofil, in dem das Brechungsindexprofil und die Morphologie des Halbleiterbauelements enthalten sind, extrahiert werden. Das Phasenprofil korreliert mit der zeitabhängigen Änderung des Brechungsindex. Die Änderungen des Brechungsindex werden durch eine Änderung der Temperatur und bzw. der freien Ladungsträgerdichte innerhalb des Halbleiterbauelements verursacht. Die gemessene Phasenänderung wird durch das Integral der Brechungsindexänderung entlang des optischen Weges des Lichtstrahls im Halbleiterbauelement festgelegt. Auf diese Weise können Bilder der Temperaturverteilung und der Verteilung der Ladungsträgerdichte erzeugt werden.

Durch die Detektion von mindestens zwei Interferenzbildern kann eine Untersuchung der internen physikalischen Eigenschaften des zu testenden Halbleiterbauelements unter unterschiedlichen Belastungszuständen in Abhängigkeit der Zeit abgebildet werden. Die Abbildung wird über die Abbildung der Phasenverschiebung, welche durch die Änderung des Brechungsindex im Inneren des Halbleiterbauelements verursacht wird, bewerkstelligt. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine zeitaufgelöste zweidimensionale Darstellung von Brechungsindexänderungen innerhalb des Volumens eines Halbleiterbauelements oder Schaltkreises. Unter Voraussetzung der Verwendung kurzer Lichtimpulse und/oder sehr schneller Detektoren sind extrem hohe Zeitauflösungen im Nanosekundenbereich erreichbar.

Für qualitative Auswertungen während des optischen Testens von Halbleiterbauelementen können Lichtstrahlen nahezu beliebig langer Kohärenzlänge verwendet werden. Zur quantitativen Analyse



von Halbleiterbauelementen ist es vorteilhaft, wenn die Kohärenzlänge des Lichtstrahls geringer ist als die optische Weglänge

$2 \cdot L \cdot n$  des zu testenden Halbleiterbauelements, wobei  $L$  die Dicke und  $n$  der mittlere Brechungsindex des Materials des Halbleiterbauelements ist. Durch die Verwendung eines Lichtstrahls, dessen Kohärenzlänge geringer ist als die optische Weglänge des zu testenden Halbleiterbauelements, wird ein korrektes Interferogramm erhalten, welches von den Effekten der interessierenden internen physikalischen Eigenschaften des Halbleiterbauelements bestimmt und nicht von Vielfachreflexionen durch die Bauelement-Oberflächen verfälscht wird. Die Verwendung einer ausreichend kurzen Kohärenzlänge und das dadurch bedingte Ausschalten des Einflusses von Vielstrahlinterferenzen innerhalb des Halbleiterbauelements vereinfachen die Anordnung, da eine Antireflexionsbeschichtung der Rückseite des Halbleiterbauelements vermieden werden kann. Eine derartige Beschichtung ist sehr teuer und aufwendig und würde das Verfahren zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen erschweren. Durch die Ausschaltung unerwünschter Interferenzen ist eine quantitative Analyse der Daten und eine eindeutige Interpretation möglich.

Wenn gemäß einem weiteren Merkmal der Erfindung der Durchmesser des Probenstrahls adjustiert wird, kann erreicht werden, dass das gewünschte Areal des Halbleiterbauelements vom Probenstrahl erfasst wird, so dass eine Messung für das gesamte zu untersuchende Areal resultiert. Die Adjustierung des Durchmessers des Probenstrahls kann mit entsprechenden Strahlaufweitern oder Galileo-Mikroskopen in herkömmlicher Art und Weise erfolgen.

Vorteilhafterweise werden die detektierten Interferenzbilder gespeichert, wobei die Daten vor der Speicherung, beispielsweise mittels eines Videorecorders oder eines Computers, vorzugsweise digitalisiert werden.

Dabei werden die unterschiedlichen Belastungszustände durch die Anregung des Halbleiterbauelements mit zumindest einer externen Belastung hervorgerufen, durch die bestimmte Eigenschaften des Halbleiterbauelements beeinflusst werden, und es wird zumindest ein Lichtstrahl während der externen Belastung ausgesandt und ein entsprechendes Interferenzbild detektiert. Durch den Vergleich zeitlich aufeinander folgender Interferenzbilder in Abhängigkeit der Belastung können wichtige Informationen über bestimmte physikalische Eigenschaften des Halbleiterbauelements



in Abhängigkeit der Belastung gewonnen werden. Dabei kann das Halbleiterbauelement ohne Belastung und unter einer Belastung oder unter verschieden starken Belastungen untersucht werden.

Dabei wird die externe Belastung vorzugsweise durch Hochspannungs- oder Hochstromimpulse hervorgerufen. Ebenso können Lichtblitze als externe Belastungsquellen für die zu testenden Halbleiterbauelemente verwendet werden.

Um zeitaufgelöste Interferenzbilder der Halbleiterbauelemente für einzelne Belastungsimpulse zu erhalten, werden vorzugsweise mehrere Lichtstrahlen vor, während und bzw. oder nach der Belastung ausgesandt und die entsprechenden Interferenzbilder detektiert. Durch Subtraktion der aus den Interferenzbildern extrahierbaren Phasenprofile vor der externen Belastung und während der externen Belastung kann ein mit der zeitabhängigen Änderung des Brechungsindex korrelierendes Phasenprofil ermittelt werden und es können somit interne physikalische Parameter der Halbleiterbauelemente, wie die Temperatur oder die Dichte der freien Ladungsträger, in Abhängigkeit der Zeit während eines einzelnen Belastungsimpulses abgebildet werden. Durch den externen Belastungsimpuls werden freie Ladungsträger und bzw. oder eine lokale Erwärmung im Halbleiterbauelement erzeugt.

Um ein zeitlich beliebiges Auftreten der externen Belastung zu ermöglichen, um beispielsweise zufällige Belastungen simulieren zu können, ist vorgesehen, dass die Belastung detektiert wird, und zumindest ein Lichtstrahl eine vordefinierte Zeit nach der Detektion der Belastung ausgelöst wird.

Zur Messung der Temperatur- oder Ladungsträgerdichte-Verteilung im Halbleiterbauelement während einer Belastung kann auch ein Lichtstrahl längerer Dauer zumindest während des belasteten Zustands ausgesandt werden und vor, während und bzw. oder nach des belasteten Zustands mehrere Interferenzbilder detektiert werden. Dies stellt eine Variante zur Verwendung mehrerer Lichtimpulse dar, wobei, beispielsweise mit Hilfe sogenannter "gateder Detektionssysteme", mehrere zeitlich aufeinander folgende Interferenzbilder aufgenommen werden können.

Zur Erhöhung der Qualität der Messdaten kann die Rückseite des Halbleiterbauelements vor dem optischen Testen poliert werden.

Um mehrere zeitlich aufeinander folgende Interferenzbilder detektieren zu können, können die resultierenden interferierenden

Lichtstrahlen aufgespaltet werden und die aufgespalteten Teilstrahlen von einzelnen Detektionssystemen aufgenommen werden.

Damit können Interferenzbilder zu zwei oder mehreren Zeitpunkten von verschiedenen Detektionssystemen aufgenommen werden.

Dabei kann das Detektionssystem in Abhängigkeit der ausgesandten Lichtstrahlen aktiviert werden und die ausgesandten Lichtstrahlen unterschiedliche Polarisierung, vorzugsweise orthogonale Polarisierung, oder unterschiedliche Wellenlänge aufweisen. Der Lichtstrahl kann dann in Abhängigkeit seiner Eigenschaften (Polarisierung, Wellenlänge) aufgespaltet werden und durch eigene Detektionssysteme zu jedem Zeitsegment aufgenommen werden. Durch Vergleich der Interferenzbilder können die Informationen über das Verhalten des Halbleiterbauelements in Abhängigkeit der verschiedenen Belastungen gewonnen werden.

Als Referenzstrahl kann anstelle eines üblicherweise an einem Referenzspiegel reflektierten Lichtstrahls ein an einem Referenzhalbleiterbauelement reflektierter Lichtstrahl verwendet werden, wobei das Referenzhalbleiterbauelement mit dem zu testenden Halbleiterbauelement identisch ist und während des Testverfahrens keiner externen Belastung ausgesetzt wird.

Wenn der Referenzstrahl abgeschwächt wird, kann der Kontrast der Interferenzlinien im Interferenzbild optimiert werden.

Wenn der Referenzstrahl in seiner Lage verändert wird, beispielsweise durch Verkippen des Referenzspiegels, kann der Abstand der Interferenzlinien im Interferenzbild eingestellt werden.

Vorzugsweise werden die zeitlich hintereinander aufgenommenen Interferenzbilder automatisch miteinander verglichen, so dass die Informationen über die gewünschten physikalischen Parameter des Halbleiterbauelements rasch gewonnen und analysiert werden können.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht in der Schaffung einer Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen der angegebenen Art, welche möglichst einfach aufgebaut ist und zuverlässige Messungsergebnisse liefert.

Gelöst wird diese Aufgabe dadurch, dass die Rückseite des Halbleiterbauelements dem Probenstrahl zugewandt ist, und dass eine Einrichtung zur Aufnahme zumindest zweier Interferenzbilder in zeitlichen Abständen vorgesehen ist. Durch diese Einrichtung wird die zeitaufgelöste Abbildung bestimmter physikalischer Pa-

02890

- 16 -

rometer, wie der Temperatur oder der freien Ladungsträgerdichte, in Halbleiterbauelementen von der Chiprückseite her möglich.

Um möglichst das ganze zu testende Halbleiterbauelement mit einem einzigen Messdurchgang erfassen und analysieren zu können, ist vor der Lichtquelle vorzugsweise eine Einrichtung zur Adjustierung des Durchmessers des ausgesandten Lichtstrahls an das zu untersuchende Areal des Halbleiterbauelements angeordnet. Beispielsweise kann die Einrichtung durch einen Strahlaufweiter zur Vergrößerung des Durchmessers des ausgesandten Lichtstrahls oder ein Mikroskop zur Verkleinerung des Durchmessers des ausgesandten Lichtstrahls realisiert sein. Ein Strahlaufweiter wird beispielsweise durch die Anordnung von Linsen bestimmter Brennweite gebildet.

Zum Speichern der aufgenommenen Interferenzbilder und zur nachträglichen mathematischen Erfassung ist vorzugsweise ein Speicher vorgesehen. Ein derartiger Speicher kann beispielsweise durch einen Videorecorder oder einen entsprechenden Rechner gebildet sein.

Um insbesondere für die Fehleranalyse das Verhalten eines Halbleiterbauelements im Belastungsfall untersuchen zu können, kann eine Belastungseinrichtung zum Aussenden einer externen Belastung für das Halbleiterbauelement vorgesehen sein, welche beispielsweise durch eine Hochspannungs- oder Hochstromquelle oder durch eine Lichtquelle zur Aussendung von starken Lichtblitzen gebildet sein kann.

Um eine Aufzeichnung der Interferenzbilder in Abhängigkeit zufällig auftretender Belastungsimpulse zu ermöglichen, ist die Belastungseinrichtung vorzugsweise mit einer Einrichtung zur Steuerung der Lichtquelle verbunden, welche das Aussenden von Lichtstrahlen und somit das Einleiten von Messungen am Halbleiterbauelement in zeitlicher Abhängigkeit des Belastungsimpulses steuern kann.

Dabei kann die Steuereinrichtung eine Verzögerungseinrichtung beinhalten, so dass die Messung eine vorbestimmte Zeitspanne nach Einleitung des Belastungsimpulses ausgelöst werden kann.

Zur Aufzeichnung mehrerer zeitlich aufeinander folgender Interferenzbilder können mehrere Detektionssysteme mit vorgeschalteten Strahlteilern vorgesehen sein.

Zur Unterscheidung der ausgesandten Lichtstrahlen bei der Verwendung mehrerer Detektionssysteme kann eine Polarisations-

einrichtung zur Änderung der Polarisierung der ausgesandten Lichtstrahlen und-bzw.-oder-eine-Einrichtung zur Selektion der Wellenlänge der ausgesandten Lichtstrahlen vorgesehen sein.

Zur Verbesserung der Messergebnisse kann vor dem Halbleiterbauelement ein Kollimator zur Parallelisierung des Probenstrahls angeordnet sein.

Zur Optimierung des Kontrasts der Interferenzlinien im resultierenden Interferenzbild kann im Gang des Referenzstrahls ein Abschwächer angeordnet werden.

Durch Vorsehen einer Einrichtung zur Veränderung der Lage des Referenzstrahls, welche beispielsweise durch eine Einrichtung zum leichten Verkippen des Referenzspiegels realisiert werden kann, ist es möglich, den Abstand der Interferenzlinien im Interferenzbild einzustellen.

Zum leichteren und rascheren Vergleich der zeitlich hintereinander aufgenommenen Interferenzbilder kann eine Einrichtung zum automatischen Vergleichen der gespeicherten Interferenzbilder vorgesehen sein, welche beispielsweise durch einen entsprechenden Rechner gebildet sein kann.

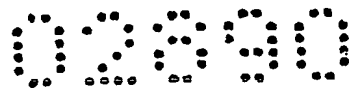
Vorzugsweise ist die Lichtquelle eines monochromatischen Lichtstrahls durch einen Laser gebildet.

Die Detektionseinrichtung kann beispielsweise eine Vidicon- oder CCD-Kamera oder auch einen zweidimensionalen Multielement-Detektor beinhalten. Zur geeigneten Detektion zweidimensionaler Interferenzbilder eignen sich auch Detektor-Arrays.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der beigefügten Abbildungen näher erläutert. Dabei zeigen Fig. 1 ein Blockschaltbild einer Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen; Fig. 2 einen schematischen Querschnitt durch ein Halbleiterbauelement, welches von Lichtstrahlen durchdrungen wird; Fig. 3a eine Draufsicht auf ein Halbleiterbauelement mit einer Oberflächen-Morphologie auf der Vorderseite; Fig. 3b einen Schnitt durch das Halbleiterbauelement gemäß Fig. 3a entlang der Schnittlinie III-III; Fig. 3c die optische Phasenverschiebung längs der Schnittlinie III-III in Abbildung 3a, welche durch die Morphologie der Vorderseite des Halbleiterbauelements verursacht wird; Fig. 3d den Verlauf des Brechungsindex längs der Schnittlinie III-III im belasteten Zustand und Fig. 3e den Verlauf der optischen Phasenverschiebung längs der Schnittlinie III-III im Halbleiterbauelement, welche durch den kombi-

nierten Effekt der Oberflächen-Morphologie auf der Vorderseite des Halbleiterbauelements und durch die Änderung des Brechungsindex im Bauelement verursacht wird; Fig. 4 an ein Beispiel für ein Interferenzbild des Halbleiterbauelements, welches durch die Morphologie des Bauelements und durch den Verlauf des Brechungsindex im unbelasteten Fall entsprechend Fig. 3a verursacht wird und Fig. 4b den Verlauf der Lichtintensität längs der Linie IV-IV in Abbildung 4a; Fig. 5a das Beispiel für ein Interferenzbild eines Halbleiterbauelements mit Einfluss der Oberflächenmorphologie und den Verlauf des Brechungsindex im angeregten Zustand entsprechend den Fig. 3a und 3e sowie Fig. 5b den Verlauf der Lichtintensität längs der Linie V-V in Fig. 5a; Fig. 6a ein Beispiel für ein Interferenzbild eines Halbleiterbauelements mit Einfluss der Oberflächen-Morphologie und des Verlaufs des Brechungsindex im unbelasteten Zustand und Fig. 6b das Interferenzbild gemäß Abbildung 6a mit Einfluss der Oberflächen-Morphologie und des Verlaufs des Brechungsindex im angeregten Zustand; Fig. 7 die schematischen Zeitverläufe der Signale während der Anwendung des Verfahrens zum optischen Testen eines Halbleiterbauelements unter Belastung; Fig. 8 ein vereinfachtes Blockschaltbild einer Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen; Fig. 9 eine Variante einer Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen; Fig. 10 die schematischen Zeitverläufe der Signale während der Messung mit einer Einrichtung gemäß Fig. 9; Fig. 11 das Blockschaltbild einer Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen unter Verwendung zweier Detektionssysteme; Fig. 12 die schematischen Zeitverläufe des Belastungsimpulses und der Lichtimpulse während der Durchführung des Verfahrens mit einer Einrichtung gemäß Fig. 11; Fig. 13 eine Variante einer Testeinrichtung unter Verwendung von Lichtstrahlen verschiedener Polarisierung; Fig. 14 eine Variante einer Testeinrichtung unter Verwendung zweier Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlänge; Fig. 15 eine weitere Variante einer Testeinrichtung unter Verwendung einer Lichtquelle in Langpulsbetrieb und eines zeitlich gesteuerten Detektionssystems; und Fig. 16 ein Schema der zeitlichen Abfolge der Signale bei einer Messung mit Hilfe der Einrichtung gemäß Fig. 15.

Fig. 1 zeigt ein Blockschaltbild einer Ausführungsform einer Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen unter Verwendung eines optischen Interferenzsystems. Die Einrichtung



besteht aus zumindest einer Lichtquelle 1 zur Aussendung eines ~~monochromatischen Lichtstrahls 2 mit einer Wellenlänge  $\lambda$ , welche~~ für das Material des dazu testenden Halbleiterbauelements 12 zumindest teilweise transparent ist. Der ausgesandte monochromatische Lichtstrahl 2 kann einen Strahlaufweiter 5 passieren, welcher beispielsweise aus entsprechend angeordneten Linsen 3 und 4 bestehen kann und zur Vergrößerung des Strahldurchmessers des Lichtstrahls 2 dient. Der ausgesandte monochromatische Lichtstrahl 2 wird in einem Strahlteiler 8 in einen Probenstrahl 16 und einen Referenzstrahl 15 geteilt. Der Probenstrahl 16 wird auf die Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 gerichtet und durchdringt das Halbleiterbauelement 12 und wird an seiner Vorderseite 23 reflektiert, worauf dieser noch einmal das Halbleiterbauelement 12 passiert und an der Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 der reflektierte Lichtstrahl 20 austritt. Der Probenstrahl 16 kann einen Kollimator 10 durchlaufen, welcher beispielsweise aus einer Linse 9 und einem Objektiv 11 besteht. Die Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 kann auf optische Qualität poliert sein. Der vom Halbleiterbauelement 12 reflektierte Lichtstrahl 20 enthält die Information über die räumliche Verteilung der Phasenverschiebung, welche durch die Modulation des Brechungsindex  $n$  im Halbleiterbauelement 12 und durch die Morphologie auf der Vorderseite 23 des Halbleiterbauelements 12 verursacht wird. Wenn der Brechungsindex  $n$  im Halbleiterbauelement 12 auch einer zeitlichen Änderung unterworfen ist, enthält der reflektierte Lichtstrahl 20 ebenfalls die Information über die zeitliche Entwicklung des Brechungsindex  $n$  innerhalb des Halbleiterbauelements 12. Der Durchmesser des auf das Halbleiterbauelement 12 auftreffenden Probenstrahls 16 hängt vom Durchmesser des ausgesandten Lichtstrahls 2 ab und kann durch den Strahlaufweiter 5 und den allfälligen Kollimator 10 eingestellt werden. Das Halbleiterbauelement 12 kann auf einem Tisch 13 angeordnet werden, welcher in verschiedene Richtung bewegt werden kann. Der vom Halbleiterbauelement 12 reflektierte Lichtstrahl 20, wird am Strahlteiler 8 reflektiert und auf das Detektionssystem 41 gerichtet. Der Referenzstrahl 15 wird von einem Referenzspiegel 24 reflektiert und produziert den Lichtstrahl 25, der ebenfalls den Strahlteiler 8 passiert und auf das Detektionssystem 41 auftrifft. Durch die Überlagerung des vom Halbleiterbauelement 12 reflektierten Lichtstrahls 20 und den am

Referenzspiegel 24 reflektierten Lichtstrahl 25 wird ein Interferenzbild erzeugt, welches durch beispielsweise eine Kamera 22 mit vorgeschalteter Linse 27 des Detektionssystems 41 betrachtet und aufgezeichnet werden kann. Die Lage der Interferenzmaxima und -minima im Interferenzbild hängt von der räumlichen Verteilung der optischen Weglängendifferenz(phase) zwischen dem Referenzstrahl 15 und dem Probenstrahl 16 ab. Durch die Anordnung eines Abschwächers 26 zwischen dem Referenzspiegel 24 und dem Strahlteiler 8 kann eine Optimierung des Kontrasts der Interferenzlinien im Interferenzbild erfolgen. Durch Kippen des Referenzspiegels 24 kann der Abstand der Interferenzlinien im Interferenzbild eingestellt werden. Die in Fig. 1 dargestellte Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen 12 verwendet ein Michelson-ähnliches Interferometer. Es können aber auch andere Typen eines Interferometers (beispielsweise Mireau oder Linic) eingesetzt werden, um ein Interferenzbild des Halbleiterbauelements 12 zu erzeugen. Ein Interferenzbild kann in der Kamera 22 des Detektionssystems 41 beobachtet werden, wenn der Unterschied in den optischen Weglängen des Probenstrahls 16 und des Referenzstrahls 15 innerhalb der Kohärenzlänge  $L_{coh}$  der verwendeten Lichtquelle 1 liegt.

Fig. 2 zeigt eine detaillierte Darstellung der Lichtwege in einem Halbleiterbauelement 12 mit der Dicke  $L$  im Querschnitt, wobei ein auf die Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 auftreffender Lichtstrahl 16 eingezeichnet ist. Innerhalb des Halbleiterbauelements 12 ist ein Bereich 17 eingezeichnet, in dem eine Änderung des Brechungsindex  $n$  beispielsweise durch einen externen Belastungsimpuls hervorgerufen wurde. An der Vorderseite 23 des Halbleiterbauelements 12 ist eine Änderung in der Oberflächenmorphologie skizziert. Der auf die Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 auftreffende Lichtstrahl 16 wird in einen in das Halbleiterbauelement 12 eindringenden Lichtstrahl 30 und einen an der Rückseite 18 reflektierten Lichtstrahl 31 geteilt. Der eindringende Lichtstrahl 30 wird an der Vorderseite 23 des Halbleiterbauelements 12 reflektiert. Dieser reflektierte Lichtstrahl 32 passiert das Halbleiterbauelement 12 erneut und dringt zum Teil durch die Rückseite 18 nach außen aus und bildet den Lichtstrahl 33, wird aber zum Teil an der Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 reflektiert, worauf ein Lichtstrahl 34 wiederum in Richtung der Vorderseite 23 das Halbleiterbauelement 12

durchdringt. An der Vorderseite 23 des Halbleiterbauelements 12 wird ~~dieser Lichtstrahl 34~~ wiederum reflektiert und bildet einen Lichtstrahl 35, der zum Teil aus dem Halbleiterbauelement 12 austritt (Lichtstrahl 36) und zum Teil erneut an der Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 reflektiert wird (Lichtstrahl 37) usw. Dieser Vorgang ist in der Optik als Mehrfachreflexion bekannt. Der vom Halbleiterbauelement 12 reflektierte Lichtstrahl ist daher eine komplizierte Summe von Beiträgen der Lichtstrahlen 31, 33 und 36 gemäß Fig. 2. Die räumliche Verteilung der Phase und der Intensität im reflektierten Strahl ist durch die Morphologie und Reflektivität an der Vorderseite 23 und durch die Variation des Brechungsindex  $n$  im Gebiet 17 und durch die Absorption im Substrat des Halbleiterbauelements 12 und durch die Reflektivität der Rückseite 18 und der Dicke  $L$  des Substrats des Halbleiterbauelements 12 bestimmt. Dies ergibt eine sehr komplizierte Funktion.

Ein zentraler Aspekt der Erfindung ist es, den Einfluss der Reflektivität der Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 zu eliminieren, und es dadurch zu ermöglichen die gemessene Phasenverschiebung direkt mit der Änderung des Brechungsindex im Bereich 17 in Beziehung zu setzen. Dies kann entweder durch Aufbringen einer Antireflexionsbeschichtung auf der Rückseite 18 oder durch die Verwendung von Licht mit einer genau gewählten Kohärenzlänge für die Erzeugung des Interferenzbilds erzielt werden. Das Aufbringen einer Antireflexionsbeschichtung ist schwierig und für eine industrielle Anwendung der Methode zu umständlich. Für quantitative Aussagen bei der optischen Untersuchung von Halbleiterbauelementen werden vorzugsweise Lichtstrahlen 2 mit einer Kohärenzlänge  $L_{coh}$  verwendet, welche geringer ist als die optische Weglänge  $2 \cdot L \cdot n$  des zu testenden Halbleiterbauelements 12, wobei  $L$  die Dicke und  $n$  der mittlere Brechungsindex des Materials des Halbleiterbauelements 12 ist. Weiters wird vorzugsweise eine Wellenlänge  $\lambda$  des von der Lichtquelle 1 ausgesandten Lichtstrahls 2 gewählt, so dass die Energie der Photonen geringer ist als der Bandabstand des Materials des Halbleiterbauelements 12. Die Intensität des reflektierten Strahls 20 muss groß genug sein, um von der Kamera 22 detektiert zu werden. Für Silizium zum Beispiel kann die Wellenlänge im Bereich  $1,1\mu m - 2\mu m$  liegen, für Gallium-Arsenid im Bereich  $980nm - 1,5\mu m$ . Für Silizium liegt die optimale Wellenlänge bei  $1,3\mu m$  bis



1,5µm, da dies weit von der Absorptionskante entfernt ist und die Band-zu-Band Absorption auch bei höheren Temperaturen (500-700K) vernachlässigt werden kann, was die Aufnahme von Interferenzbildern bei diesen Temperaturen ohne störende Absorption ermöglicht. Die Verwendung noch längerer Lichtwellenlängen ist nicht sinnvoll, da die räumliche Auflösung vermindert wird und die Absorption durch freie Ladungsträger erhöht wird. Da die optische Weglängendifferenz durch die Änderung des Brechungsindex im Gebiet 17 des Halbleiterbauelements 12 in der Größenordnung mehrerer Lichtwellenlängen liegt, sollte die Kohärenzlänge  $L_{coh}$  der verwendeten Lichtquelle größer als einige Wellenlängen  $\lambda$  sein. Deshalb muss eine Laserlichtquelle verwendet werden. Um ein Interferenzbild zu erzeugen, welches nur vom Lichtstrahl 33 gemäß Fig. 2 erzeugt wird und vom zweifachen Durchgang durch das Halbleiterbauelement 12 herrührt, muss die Kohärenzlänge der verwendeten Laserlichtquelle kürzer sein als die optische Weglänge

$2 \cdot L \cdot n$  im Bauelement 12, wobei  $L$  die Substratdicke und  $n$  der Brechungsindex des Materials des Halbleiterbauelements 12 ist. Unter diesen Voraussetzungen werden die mehrfach reflektierten Strahlen, wie zum Beispiel 31 und 36 (aus Fig. 2), nicht mit dem Referenzstrahl 25 (siehe Fig. 1) interferieren können. Der von der Rückseite 18 des Halbleiterbauelements 12 reflektierte Strahl 31 wird daher lediglich den Hintergrund des Interferenzbilds aufhellen und damit den Kontrast der Interferenzlinien (die Sichtbarkeit des Interferenzbilds) geringfügig vermindern. Die weiteren reflektierten Strahlen, wie zum Beispiel der Strahl 36, resultieren aus einer vierfachen (und mehrfachen) Passage des Lichts durch das Halbleiterbauelement 12. Aufgrund der geringen Intensität dieser Strahlen tragen diese nur mehr als Hintergrund zum Nutzbild bei. Es sei angemerkt, dass bei einer sehr viel größeren Kohärenzlänge  $L_{coh} \gg 2Ln$  das Interferenzbild des Bauelements sehr viel komplexer und damit weniger leicht interpretierbar wird, da die Phasenverschiebung nicht nur mehr durch die Temperatur im Halbleiterbauelement 12 sondern auch durch die Abmessung  $L$  des Halbleiterbauelements 12 bestimmt wird. Eine weitere Anforderung für die Lichtquelle 1 ist eine ausreichende räumliche Kohärenz um ein Interferenzbild mit hohem Kontrast im gesamten Bildfeldbereich zu erzeugen.

Die Beziehung des räumlichen Profils des Bereichs 17 innerhalb des Halbleiterbauelements 12 mit der Änderung im Brechungs-

index und der Morphologie der Vorderseite 23 des Halbleiterbauelements 12 wird anhand der Fig. 3a bis 3e erläutert. Die Fig. 3a und 3b repräsentieren ein Beispiel für die laterale Ansicht und einen Querschnitt durch ein Bauelement 12. Im Bereich 51 befindet sich eine Stufe im Halbleiterbauelement 12, welche eine Verlängerung des optischen Weges verglichen mit den anderen Bereichen verursacht. Die Fig. 3c zeigt das durch diese optische Weglängendifferenz verursachte Profil der Phasenverschiebung in einem Bauelement 12, welches sich im unerregten Zustand befindet. Die Phasenverschiebung im Bereich 51 ist größer als in den übrigen Bereichen entlang der Schnittlinie III-III gemäß Fig. 3a. Ein Beispiel für einen Bereich mit einer Variation des Brechungsindex ist in der lateralen Ansicht und im Querschnitt in den Fig. 3a und 3b mit 52 und 54 bezeichnet. Ein Beispiel für das Profil des Brechungsindex längs der Linie 58 in Fig. 3b, wenn sich das Bauelement 12 im belasteten Zustand befindet, ist in Fig. 3d gezeigt. Anstelle des absoluten Brechungsindex kann auch der relative Brechungsindex bzw. die Brechungsindexänderung dargestellt werden. In diesem Beispiel ist die Änderung des Brechungsindex, unter der Annahme einer Temperaturerhöhung, in den Bereichen 52, 54 positiv. Das Profil der Phasenverschiebung, hervorgerufen durch die Oberflächenmorphologie von der Vorderseite 23 des Bauelements 12 und die Brechungsindexänderung im Bereich 54 im belasteten Zustand ist in Fig. 3e gezeigt.

Die Fig. 4a und 5a zeigen illustrative Beispiele für zweidimensionale Interferenzbilder des Halbleiterbauelements 12 im unbelasteten bzw. im belasteten Zustand, mit der selben Struktur, Oberflächenmorphologie und Brechungsindexprofil wie in Fig. 3a und 3b. Dabei ist der Referenzspiegel 24 senkrecht auf den Referenzstrahl 15 (siehe Fig. 1) ausgerichtet, so dass ein einziger, unendlich ausgedehnter Interferenzstreifen entsteht. Die entsprechenden Lichtintensitätsprofile längs der Linien IV-IV in den Fig. 4a und V-V in Fig. 5a sind in den Fig. 4b bzw. 5b wiedergegeben. Der Kontrastunterschied zwischen den Gebieten 64 und 65 in Fig. 4a entsteht durch die optische Weglängendifferenz zwischen dem Bereich 51 und dem übrigen Bereich des Halbleiterbauelements 12 gemäß Fig. 3b. Das Interferenzbild des Bauelements 12 im belasteten Zustand in Fig. 5a zeigt zusätzliche Interferenzmaxima und -minima, welche durch die Brechungsindexänderung im Bereich 66 (in diesem Fall Erhöhung des Brechungsindex, siehe

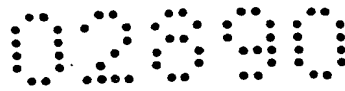


Fig. 3d) entstehen. Es sei bemerkt, dass der kürzeste Abstand zwischen zwei Interferenzmaxima (oder -minima) einem Phasenunterschied von  $2\pi$  entspricht.

In einigen Fällen ist es für die Auswertung der Phasenverschiebung von Vorteil, wenn das Interferenzbild Interferenzstreifen aufweist. Solche Bilder eignen sich besonders für die computerunterstützte Auswertung der Phasenverschiebung mit sogenannten "Fast Fourier Transform" (FFT) Algorithmen. Die Interferenzstreifen können durch ein leichtes Verkippen des Referenzspiegels 24 erzeugt werden, so dass die Lichtstrahlen 20 und 25 zwischen dem Strahlteiler 8 und der Detektionseinheit 41 (in Fig. 1) nicht mehr parallel sind. Das erzeugt einen Phasengradienten, durch welchen Interferenzmaxima und -minima, Interferenzstreifen genannt, entstehen. Der Abstand und die Ausrichtung der Interferenzstreifen hängt vom Kippwinkel des Referenzspiegels 24 gegenüber dem Referenzstrahl 15 ab. Beispiele für Interferenzbilder mit Interferenzstreifen, wie sie in einem Halbleiterbauelement 12 auftreten, das die selbe Morphologie und Brechungsindexänderung aufweist, wie das in Fig. 3a und 3b gezeigt, sind für den unbelasteten und belasteten Zustand in den Fig. 6a und 6b schematisch abgebildet. Im unbelasteten Zustand sind die Interferenzstreifen im Bereich 67 wegen der optischen Weglängendifferenz zwischen den Bereichen 51 und den übrigen Bereichen (in Fig. 3) verschoben. Für den belasteten Zustand werden die Interferenzstreifen zusätzlich im Bereich 68, durch die angenommene Änderung des Brechungsindex (wie in Fig. 3d gezeigt), deformiert und verschoben.

Eine Methode um die Phasenverschiebung aus dem Interferenzbild zu erhalten, ist die Durchführung einer zweidimensionalen Fourieranalyse des Interferenzmusters, wie in den Fig. 6a und 6b dargestellt und die Extraktion der Phasenverteilung aus deren Ergebnis. Eine weitere Methode ist es, die Phasenverschiebung direkt aus der räumlichen Verschiebung der Interferenzstreifen zu gewinnen. Beide Methoden sind bekannte Verfahren in der Verarbeitung von Interferenzbildern.

Fig. 7 zeigt die schematischen Zeitabläufe bei der Durchführung des Verfahrens zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen 12, bei dem ein Interferenzbild eines Halbleiterbauelements 12, das durch einen kurzen Belastungsimpuls angeregt wurde, erzeugt wird. Gemäß Fig. 7 wird das zu testende



Halbleiterbauelement 12 über die Zeit  $T$  einer Belastung in Form eines Belastungsimpulses 70 ausgesetzt. Übliche Zeiten  $T$  für den Belastungsimpuls 70 betragen zwischen 10ns und 100ns, es können aber auch längere Impulse angewendet werden. Der Belastungsimpuls 70 kann zur Simulation von plötzlichen Belastungen zeitlich zufällig erfolgen oder durch ein externes Auslösesignal gesteuert werden. Nach der Detektion des Beginns des Belastungsimpulses 70 wird vorzugsweise nach einer bestimmten Zeitspanne  $t_b$  die Auslösung eines Lichtimpulses 71 mit der Dauer  $t_p$  ausgelöst, worauf die Aufnahme eines Interferenzbildes des Halbleiterbauelements 12 im belasteten Zustand für ein bestimmtes Zeitfenster, welches durch die Länge  $t_p$  des ausgesandten Lichtstrahls 71 und die Verzögerungszeit  $t_b$  bestimmt ist, erfolgt. Darüber hinaus wird ein Interferenzbild des Halbleiterbauelements 12 im Ausgangszustand, also im unbelasteten Zustand, erzeugt und gespeichert. Durch die Differenz der Phasenverschiebung in den Interferenzbildern, für den unbelasteten und den belasteten Zustand kann der Einfluss des Belastungsimpulses auf den Brechungsindex  $n$  im Halbleiterbauelement 12 berechnet werden. Die Zeitauslösung wird durch die Dauer  $t_p$  des Lichtstrahls 71 und durch die zeitliche Präzision bei der Auslösung des Lichtstrahls 71 in Bezug zum Beginn des Belastungsimpulses 70 bestimmt.

Für eine rein qualitative Messung, an welcher Stelle im Bauelement sich die internen Parameter im belasteten Zustand ändern, ohne eine Information über den genauen Wert der Phasenverschiebung zu erhalten, genügt es, direkt die Interferenzbilder für den unbelasteten und den belasteten Zustand von einander zu subtrahieren. Das Differenzbild stellt das Gebiet, in dem es im angeregten Zustand zu einer Änderung in den internen Bauelemente-Parametern kommt, dar. Durch das erfindungsgemäße Verfahren ist es möglich, ein Interferenzbild des Bauelements im belasteten Zustand während eines einzelnen Belastungsimpulses 70 aufzunehmen. Dazu muss die Abbildung mittels eines einzelnen Lichtstrahls 71 erzeugt werden. Um ein solches Interferenzbild mit einer Kamera aufzunehmen, muss die Lichtintensität des Bildes sehr viel größer als die Sensitivitätsgrenze der Kamera sein. Dies kann mit einer Laser-Lichtquelle realisiert werden, die eine Pulsenergie in der Größenordnung von 1µJ erreicht. Für die Abbildung des Bauelements in einem Wellenlängenbereich  $\lambda < 1100\text{nm}$  kann eine CCD (Charged Couple Device) Kamera verwendet werden.

Für die Abbildung in einem Wellenlängenbereich  $400\text{nm} < \lambda < (1800\text{--}2200\text{nm})$  (typisch um  $1300\text{nm}$ ) kann eine Infrarotkamera verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines 'focal plane arrays', das ein CCD-ähnlicher, planarer Detektor aus einer rasterförmigen Anordnung von Halbleiterdetektoren, aus z.B. In-GaAs, ist. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung einer preisgünstigen Kamera mit einer Vidicon-Bildröhre (z.B. Hamamatsu C5310). Die Beschichtung der Vidicon-Bildröhre hat eine lange Nachleuchtdauer ( $10\text{--}100\text{ms}$ ), was das elektronische Auslesen des Interferenzbildes von der Kameraröhre nach dem Belichtungsimpuls innerhalb der Nachleuchtphase möglich macht.

Für die Belichtung des Bauelements bei einer Wellenlänge  $\lambda = 1064\text{nm}$  kann ein gütegeschaltener (Q-switched) YAG Laser verwendet werden. Für die Belichtung im infraroten und sichtbaren Bereich stehen eine Reihe von gepulsten Laserquellen zur Verfügung. Für den Bereich größerer Wellenlängen kann ein, mittels eines YAG Lasers gepumpter, optischer parametrischer Oszillator (OPO) mit einer stufenlosen Einstellbarkeit der Wellenlänge im Infrarotbereich verwendet werden.

Die Pulslänge beträgt  $5\text{ns}$ . Diese Laserquelle erreicht eine Energie von bis zu  $500\mu\text{J}$  pro Puls. Das erzeugte Laserlicht hat eine Kohärenzlänge von ca.  $300\mu\text{m}$ . Deshalb kann die störende Interferenz der Reflexionen der Strahlen 31 und 36 (in Fig. 2) von der Substratrückseite vermieden werden. Das Interferenzbild des Bauelements wird in solcher Weise ausschließlich vom Strahl 33 erzeugt. Andere Laserlichtquellen, wie zum Beispiel Hochleistungslaserdioden, könnten ebenfalls zur Belichtung des Halbleiterbauelements geeignet sein.

Fig. 8 zeigt ein Blockschaltbild einer Variante einer Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen 12 für die Steuerung der Zeitabfolge von Belastungsimpulsen und Lichtimpulsen für den Fall, dass der Belastungsimpuls zeitlich kontrolliert erfolgt. Ein Pulsgenerator 73 erzeugt ein Signal, das eine Belastungseinrichtung 74 zur Erzeugung eines Belastungsimpulses anregt. Der in der Belastungseinrichtung 74 erzeugte Belastungsimpuls wirkt auf das zu testende Halbleiterbauelement 12 ein. Der Pulsgenerator 73 bzw. die Belastungseinrichtung 74 ist mit einer Einrichtung 76 zur Steuerung der Lichtquelle 1 verbunden, welche beispielsweise eine Verzögerungsstufe enthalten kann und nach Auslösung der Belastungseinrichtung 74 durch den Puls-

generator 73 nach einer bestimmten Verzögerung einen Lichtstrahl auf das Halbleiterbauelement 12 aussendet, worauf durch das Detektionssystem 41 das Interferenzbild des Halbleiterbauelements 12 zu dem festgelegten Zeitfenster aufgenommen wird. Das von einer Kamera aufgenommene Bild kann in einem Speicher 81, beispielsweise einem Videorecorder, abgelegt werden und in einen Computer 80 übertragen werden.

Fig. 9 zeigt ein Blockschaltbild einer gegenüber Fig. 8 abgewandelten Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen 12, wobei der Belastungsimpuls zu einem zufälligen, nicht kontrollierbaren Zeitpunkt auftritt. Zufällig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die zeitliche Unsicherheit für das Auftreten des Belastungsimpulses innerhalb eines Zeitfensters liegt, welches sehr viel länger als die Dauer des Belastungsimpulses selbst ist. Die Belastungseinrichtung 74 wird von einer Pulsauslöseeinheit 82, welche im einfachsten Fall durch einen Schalter gebildet sein kann, angeregt, der zu einem zufälligen Zeitpunkt die Belastungseinrichtung 74 zur Aussendung eines Belastungsimpulses anregt und auf das Halbleiterbauelement 12 einwirken lässt. Die Belastungseinheit 74 ist mit einer Einrichtung 76 zur Steuerung der Lichtquelle 1 verbunden, so dass nach der Detektion des Auslösens des Belastungsimpulses, beispielsweise nach einer vorgegebenen Verzögerungszeit ein Lichtimpuls durch die Lichtquelle 1 ausgelöst werden kann, worauf das entstehende Interferenzbild durch das Detektionssystem 41 aufgenommen und allenfalls in einem Speicher 81 gespeichert und in einen Computer 80 weiter verarbeitet werden kann.

Fig. 10 zeigt die Zeitverläufe bei Verwendung einer Testeinrichtung gemäß Fig. 9, wobei der Belastungsimpuls 70 während einer bestimmten Dauer  $T$  und zu einem zufälligen Zeitpunkt  $t_{\text{start}}$  ausgelöst wird. Nach der Detektion des Beginns  $t_{\text{start}}$  des Belastungsimpulses 70 erfolgt nach einer gewissen Verzögerungszeit  $T_{\text{fix}}$  das Aussenden eines Lichtimpulses 71 mit einer vorgegebenen Dauer  $t_p$ . Der zufällige Belastungsimpuls 70 kann zum Beispiel als Folge von elektromagnetischen Störungen auftreten. Es kann sich dabei auch um Impulse, die durch elektrostatische Entladung (ESD) erzeugt werden, handeln. Dieser Entladungsvorgang wird gewöhnlich durch die Entladung eines geladenen Koaxialleiters (transmission line) mit einem mechanischen Schalter simuliert. Die typische Länge  $T$  eines solchen Impulses 70 ist 100ns-500ns, abhängig von

der Länge des Koaxialleiters. Das Schalten des mechanischen Schalters erfolgt typischerweise mit einer zeitlichen Unbestimmtheit von  $5\mu\text{s}$ . Somit müssen die Belastungsimpulse 70, die durch die Entladung eines solchen Koaxialleiters erzeugt werden, als zeitlich zufällig auftretend angesehen werden. Die minimale Zeitverzögerung  $T_{\text{fix}}$  ist gewöhnlich konstant und wird von der Steuerelektronik und von optischen Prozessen innerhalb der Beleuchtungsquelle bestimmt. Die Existenz dieser Verzögerungszeit  $T_{\text{fix}}$  würde im Prinzip die Abbildung des Bauelementes 12 vor dieser Zeit verhindern. Um diese Einschränkung zu umgehen, kann der Belastungsimpuls 70 mit einer Verzögerungseinheit 86 verzögert werden, so dass ein um die Zeit  $t_{\text{v}}$  verzögerter Belastungsimpuls 70' am Bauelement 12 (siehe Fig. 10) angelegt wird. Die Methodik der Pulsverzögerung in der Verzögerungseinheit 86 ist von der Art des Belastungsimpulses 70 abhängig und ist Stand der Technik. Zum Beispiel kann für den Fall der elektrostatischen Entladung eines koaxialen Leiters eine Verzögerungseinheit 86 durch Anfügen eines zusätzlichen koaxialen Leiters von bestimmter Länge realisiert werden.

Neben zeitausgelösten Aufnahmen der Änderung des Brechungsindex  $n$  unter hohem Stromstress, was zu einer großen Variation der gemessenen Phasenverschiebung führt, kann die Apparatur auch für interferometrische Messungen von kleinen Variationen des Brechungsindex unter Gleichstrombedingungen verwendet werden. Das Verfahren kann verwendet werden, um Schäden in Halbleiterbauelementen 12 oder komplexen Schaltungen zu lokalisieren unter der Bedingung, dass der Schaden lokal einen Energieverlust im Halbleiter hervorruft. Ein Beispiel für einen Schaden kann ein Kurzschluss in der Metallisation oder ein lokalisiertes Leck in einem pn-Übergang sein. Als erstes wird Interferenzbild der Probe im unbelasteten Zustand aufgenommen. In dieser Situation ist der Referenzspiegel 24 senkrecht zum Referenzstrahl 15 orientiert (siehe Fig. 1). Dann wird das Bauelement 12 durch die Anwendung des notwendigen Gleichstromes oder durch repetitive Ansteuerung in einen anderen Zustand versetzt und das Interferenzbild aufgenommen. Die beiden Interferenzbilder werden subtrahiert, was ein differenzielles Bild ergibt, bei dem die Region, in der Wärmedissipation (Schadenslokalisierung) auftritt, klar sichtbar wird. Mit der oben genannten Erfindung können Interferenzbilder von Halbleiterbauelementen für bestimmte Zeitfenster aufgenommen

werden, während das Bauelement 12 in einem bestimmten Zustand ist. Für manche Anwendungen ist es aber notwendig, die Evolution von internen Parametern wie Temperatur oder freie Ladungsträgerkonzentration während eines Stresspulses bei einem oder mehreren Zeitfenstern aufzunehmen. Fig. 11 zeigt ein Blockschaltbild einer Abwandlung einer erfindungsgemäßen Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen 12, bei dem die Lichtquelle 1 einen Lichtstrahl 2 auf ein zu testendes Halbleiterbauelement 12 aussendet und das entstehende Interferenzbild von einem Detektionssystem 41 aufgenommen wird. Ein Pulsgenerator 73 erzeugt ein Signal, das eine Belastungseinrichtung 74 zum Aussenden eines Belastungsimpulses an das zu testende Halbleiterbauelement 12 aussendet. Der Pulsgenerator 73 ist mit einer Steuereinrichtung 76 zur Steuerung der Lichtquelle 1 verbunden. Die Lichtquelle 1 erzeugt Lichtstrahlen 2 zu definierten Zeitfenstern, wobei jeder Lichtstrahl verschiedene Lichtparameter, wie z.B. Polarisierung oder Wellenlänge, haben kann. Das Detektionssystem 41 beinhaltet einen Strahlaufteiler 126, der die von der Lichtquelle 1 herrührenden Lichtstrahlen 2 in einzelne Strahlen aufspaltet, entsprechend ihren verschiedenen Lichtparametern, wie z.B. Lichtpolarisation oder Wellenlänge. Das Bild jedes einzelnen Strahles wird durch einzelne Kameras 22 aufgenommen und in Speichern 81 gespeichert. Eine beispielsweise durch einen Computer gebildete Vergleichseinrichtung 133 kann zum automatischen Vergleich der unterschiedlichen Interferenzbilder dienen.

Fig. 12 zeigt die Zeitverläufe bei Verwendung einer Einrichtung gemäß Fig. 11, wobei nach Auftreten des Belastungsimpulses 70 zwei Lichtimpulse 71 von der Lichtquelle 1 ausgesandt werden und die zugehörigen Interferenzbilder von verschiedenen Kameras aufgenommen werden.

Fig. 13 zeigt eine Realisierung einer Einrichtung gemäß Fig. 11, bei der die Lichtparameter zur Unterscheidung der von der Lichtquelle 1 ausgesandten Lichtstrahlen 2 Polarisationszustände sind. Die Polarisierung wird durch Aufteilung der von der Lichtquelle 1 ausgesandten Lichtstrahlen und kontrollierte Verzögerung in einen Polarisator 165 erzielt. Der Strahlaufteiler 126 besteht aus einem polarisierenden Strahlteiler 166, der die das Interferenzbild enthaltenden Lichtstrahlen in zwei Strahlen unterschiedlicher Polarisierung aufteilt, welche von entsprechenden Kameras 22 aufgenommen werden.



Fig. 14 zeigt eine Variante einer Einrichtung gemäß Fig. 11, bei der die Lichtquelle 1 in zwei Lichtquellen 180 und 182 mit verschiedenen Wellenlängen aufgeteilt ist, deren Lichtstrahlen in einen Strahlteiler 185 kombiniert und auf das Halbleiterbauelement 12 gerichtet werden. Im Strahlteiler 126 erfolgt eine Strahlaufspaltung in einem dikroiden Strahlteiler 189, der für eine Wellenlänge hochtransmittierend und für die andere Wellenlänge hochreflektierend ist.

Eine weitere Möglichkeit der Realisierung eines Strahlteilers 126 gemäß Fig. 11 kann durch entsprechende Frequenzfilter, die den Wellenlängenbereich für die entsprechenden Strahlen selektieren und zu verschiedenen Zeitfenstern in Beziehung stehen, realisiert werden.

In den vorher beschriebenen Methoden und Aufbauten zur Erzeugung von Probenbildern zu bestimmten Zeitfenstern wurde eine gepulste Lichtquelle 1 (Einzellichtquelle oder Vielstrahllichtquelle) zusammen mit langsamen Aufnahmekameras verwendet. Die Zeitauflösung ist durch die Zeitdauer und die Zeitverzögerung der ausgesandten Lichtpulse bestimmt. Ein anderer Aufbau für die Aufnahme der Interferenz zu verschiedenen Zeitfenstern während eines Stresspulses am Halbleiterbauelement 12 ist schematisch in Fig. 15 dargestellt. Bei dieser Methode wird das Bauelement 12 durch einen Lichtstrahl beleuchtet, der nahezu eine konstante Amplitude hat, während das Bauelement 12 in den verschiedenen Belastungszuständen ist. Die Zeitauflösung dieser Methode ist bestimmt durch die zeitabhängige Aufnahme der Probenbilder während vordefinierten Zeitfenstern durch sogenannte "gegatete" Kameras. Eine gegatete Kamera zeichnet Bilder nur zu Zeitfenstern auf, die durch ein elektronisches Gate aktiviert werden. Dabei besteht das Detektionssystem 41 aus mehreren Kameras 22, welche durch ein Strahlaufspaltungssystem 320 mit den entsprechenden Interferenzbildern in den entsprechenden Zeitfenstern versorgt werden. Zur Steuerung der gegateten Kameras 22 ist eine Zeitkontrollereinheit 331 vorgesehen. Schließlich können die aufgezeichneten Interferenzbilder zur weiteren Verarbeitung in einen Computer 133 übermittelt werden.

Fig. 16 zeigt die zeitlichen Abläufe bei Verwendung einer Einrichtung gemäß Fig. 15, wobei Interferenzbilder zu vier Zeiten während eines Belastungsimpulses 70 aufgenommen werden. Zu diesem Zweck sendet die Lichtquelle einen Lichtimpuls 71 über eine

02890

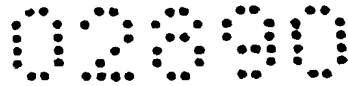
- 31 -

Dauer, die größer als die Dauer des Belastungsimpulses 70 ist,  
~~aus, und die Kameras 22 werden zu bestimmten Zeiten während der~~  
Aussendung des Lichtimpulses 71 aktiviert, so dass vier ver-  
schiedene Interferenzbilder aufgenommen werden.

Wichtig ist es hier noch zu erwähnen, dass diese Erfindung  
auch in eine Waferteststation inkorporiert werden kann, und dass  
man damit Interferenzbilder sowohl von Einzelhalbleiterbauele-  
menten als auch von Schaltkreisen auf Waferebene darstellen kann.

## Patentansprüche:

1. Verfahren zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen (12) bestimmter Dicke ( $L$ ) unter Verwendung eines optischen Interferenzsystems mit zumindest einer Lichtquelle (1) zur Aussendung eines monochromatischen Lichtstrahls (2) mit einer Wellenlänge ( $\lambda$ ), für welche das Material des Halbleiterbauelements (12) zumindest teilweise transparent ist, wobei der Lichtstrahl (2) in einen Referenzstrahl (15) und einen Probenstrahl (16) aufgetrennt wird, der Probenstrahl (16) auf das Halbleiterbauelement (12) gerichtet wird, und mit Hilfe eines Detektionssystems (41) die durch Interferenz des vom Halbleiterbauelement (12) reflektierten Lichtstrahls (20) mit dem Referenzstrahl (15) erzeugten Bilder zur zweidimensionalen Darstellung bestimmter interner physikalischer Eigenschaften des Halbleiterbauelements (12) aufgenommen wird, dadurch gekennzeichnet, dass der Probenstrahl (16) auf die Rückseite (18) des zu testenden Halbleiterbauelements (12) gerichtet wird und an dessen Vorderseite (23) reflektiert wird, und dass zumindest zwei Interferenzbilder unter unterschiedlichen Belastungszuständen des Halbleiterbauelements (12) zeitlich hintereinander detektiert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Kohärenzlänge ( $L_{\text{coh}}$ ) des Lichtstrahls (2) geringer ist als die optische Weglänge  $2 \cdot L \cdot n$  des zu testenden Halbleiterbauelements (12), wobei  $L$  die Dicke und  $n$  der mittlere Brechungsindex des Materials des Halbleiterbauelements (12) ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser des Probenstrahls (16) an das zu untersuchende Areal des Halbleiterbauelements (12) adjustiert wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die detektierten Interferenzbilder gespeichert werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die unterschiedlichen Belastungszustände durch die Anregung des Halbleiterbauelements (12) mit zumindest einer externen Belastung hervorgerufen werden, durch die bestimmten Ei-



genschaften des Halbleiterbauelements (12) beeinflusst werden,  
~~und dass zumindest ein Lichtstrahl (2) während der Belastung~~  
ausgesandt und ein entsprechendes Interferenzbild detektiert  
wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die externe Belastung durch Hochspannungs- oder Hochstromimpulse hervorgerufen wird.

7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die externe Belastung durch Lichtblitze hervorgerufen wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Lichtstrahlen (2) vor, während und bzw. oder nach der Belastung ausgesandt und die entsprechenden Interferenzbilder detektiert werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Belastung detektiert wird und zumindest ein Lichtstrahl (2) eine vordefinierte Zeit ( $t_D$ ) nach der Detektion der Belastung ausgelöst wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass ein Lichtstrahl (2) zumindest während des belasteten Zustandes ausgesandt wird, und vor, während und bzw. oder nach dem belasteten Zustand mehrere Interferenzbilder detektiert werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Rückseite (18) des Halbleiterbauelements (12) vor dem optischen Testen poliert wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die interferierenden Lichtstrahlen aufgespaltet werden und die aufgespalteten Teilstrahlen von einzelnen Detektionssystemen (41) aufgenommen werden.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Detektionssystem (41) in Abhängigkeit der ausgesandten Lichtstrahlen aktiviert wird.

14. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass die ausgesandten Lichtstrahlen (2) unterschiedliche Polarisierung, vorzugsweise orthogonale Polarisierung, aufweisen.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die ausgesandten Lichtstrahlen (2) unterschiedliche Wellenlängen aufweisen.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass als Referenzstrahl (15) ein an einem Referenz-Halbleiterbauelement reflektierter Lichtstrahl verwendet wird, wobei das Referenz-Halbleiterbauelement mit dem zu testenden Halbleiterbauelement (12) identisch ist.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass der Referenzstrahl (15) abgeschwächt wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Referenzstrahl (15) in seiner Lage verändert wird.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Interferenzbilder automatisch miteinander verglichen werden.

20. Einrichtung zum optischen Testen von Halbleiterbauelementen (12) bestimmter Dicke (L) mit zumindest einer Lichtquelle (1) zur Aussendung eines monochromatischen Lichtstrahls (2) mit einer Wellenlänge, für welche das Material des Halbleiterbauelements (12) zumindest teilweise transparent ist, und mit einem Strahlteiler (8) zum Auftrennen des Lichtstrahls (2) in einen Referenzstrahl (15) und einen Probenstrahl (16), und mit zumindest einem Detektionssystem (41) zum Aufnehmen der durch Interferenz des vom Halbleiterbauelement (12) reflektierten Lichtstrahls (20) mit dem Referenzstrahl (15) erzeugten zweidimensionalen Bilder, dadurch gekennzeichnet, dass die Rückseite (18) des Halbleiterbauelements (12) dem Probenstrahl (16) zugewandt ist, und dass eine Einrichtung (41) zur Aufnahme zumindest zweier Interferenzbilder in zeitlichen Abständen vorgesehen ist.

21. Einrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass vor der Lichtquelle (1) eine Einrichtung zur Adjustierung des Durchmessers des ausgesandten Lichtstrahls (2), beispielsweise ein Strahlaufweiter (5) zur Vergrößerung des Durchmessers, angeordnet ist.
22. Einrichtung nach Anspruch 20 oder 21, dadurch gekennzeichnet, dass ein Speicher (81) zum Speichern der aufgenommenen Interferenzbilder vorgesehen ist.
23. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass eine Belastungseinrichtung (74) zum Aussenden einer externen Belastung für das Halbleiterbauelement (12) vorgesehen ist.
24. Einrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Belastungseinrichtung (74) mit einer Einrichtung (76) zur Steuerung der Lichtquelle (1) verbunden ist.
25. Einrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuereinrichtung (76) eine Verzögerungseinrichtung beinhaltet.
26. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Detektionssysteme (41) mit vorgeschalteten Strahlteilern (126) vorgesehen sind.
27. Einrichtung nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass eine Polarisationsseinrichtung (166) zur Selektion der Polarisation der ausgesandten Lichtstrahlen (2) vorgesehen ist.
28. Einrichtung nach Anspruch 26 oder 27, dadurch gekennzeichnet, dass eine Einrichtung zur Selektion der Wellenlänge ( $\lambda$ ) der ausgesandten Lichtstrahlen (2) vorgesehen ist.
29. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 28, dadurch gekennzeichnet, dass vor dem Halbleiterbauelement (12) ein Kollimator (10) zur Parallelisierung des Probenstrahls (16) angeordnet ist.

02890

- 36 -

30. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 29, dadurch gekennzeichnet, dass im Gang des Referenzstrahls (15) ein Abschwächer (26) angeordnet ist.
31. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 30, dadurch gekennzeichnet, dass eine Einrichtung zur Veränderung der Lage des Referenzstrahls (15) vorgesehen ist.
32. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass eine Einrichtung (133) zum automatischen Vergleichen der zeitlich hintereinander aufgenommenen Interferenzbilder vorgesehen ist.
33. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 32, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquelle (1) durch einen Laser gebildet ist.
34. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 33, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionseinrichtung (41) eine Kamera (22), beispielsweise eine Vidicon- oder CCD-Kamera beinhaltet.
35. Einrichtung nach einem der Ansprüche 20 bis 34, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionseinrichtung (41) einen zweidimensionalen Multielement-Detektor beinhaltet.

GH/si

### Zusammenfassung:

---

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zum optischen Testen bestimmter interner physikalischer Parameter von Halbleiterbauelementen (12) bestimmter Dicke (L) mit zumindest einer Lichtquelle (1) zur Aussendung eines monochromatischen Lichtstrahls (2) mit einer Wellenlänge ( $\lambda$ ), für welche das Material des Halbleiterbauelements (12) zumindest teilweise transparent ist, und mit einem Strahlteiler (8) zum Auftrennen des Lichtstrahls (2) in einen Referenzstrahl (15) und einen Probenstrahl (16) und mit zumindest einem Detektionssystem (41) zum Aufnehmen der durch Interferenz des vom Halbleiterbauelement reflektierten Lichtstrahls (20) mit dem Referenzstrahl (15) erzeugten zweidimensionalen Bilder, wobei die Rückseite (18) des zu testenden Halbleiterbauelements (12) dem Probenstrahl (16) zugewandt ist, und dass eine Einrichtung (41) zur Aufnahme zumindest zweier Interferenzbilder in zeitlichen Abständen vorgesehen ist.

(Fig. 1)



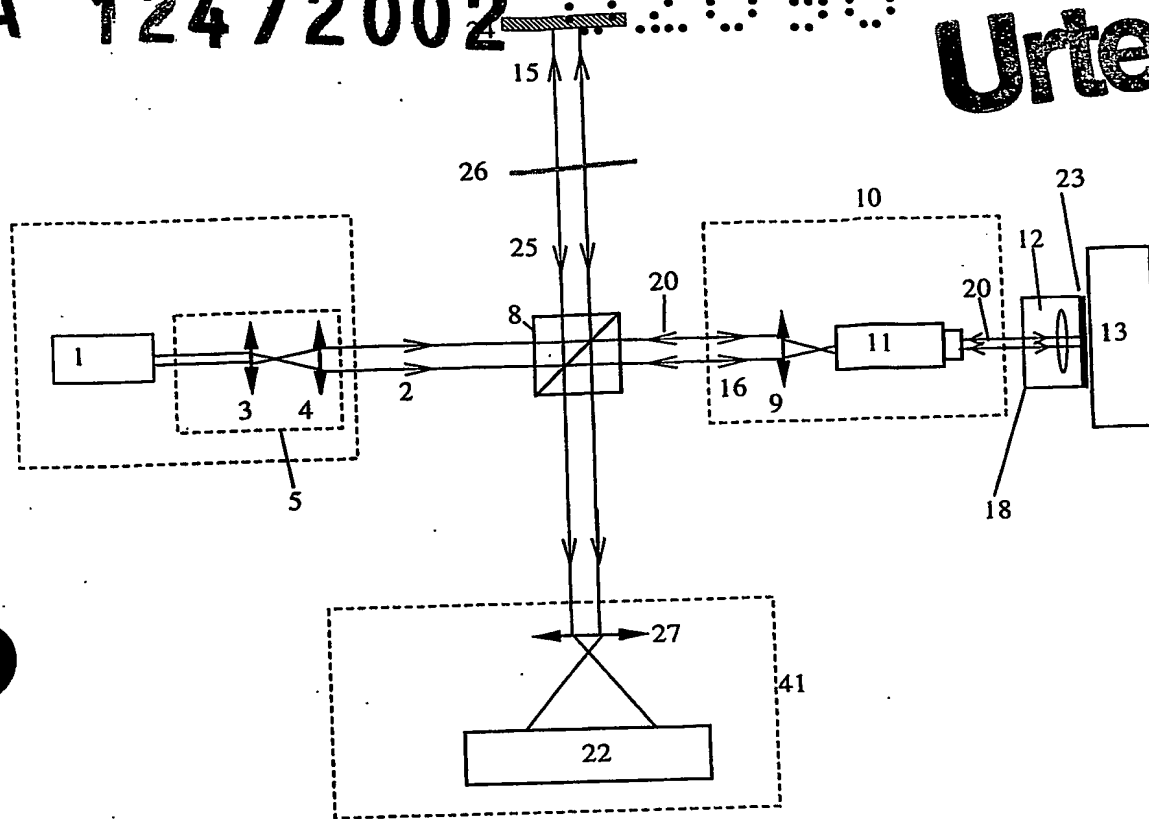


Fig.1

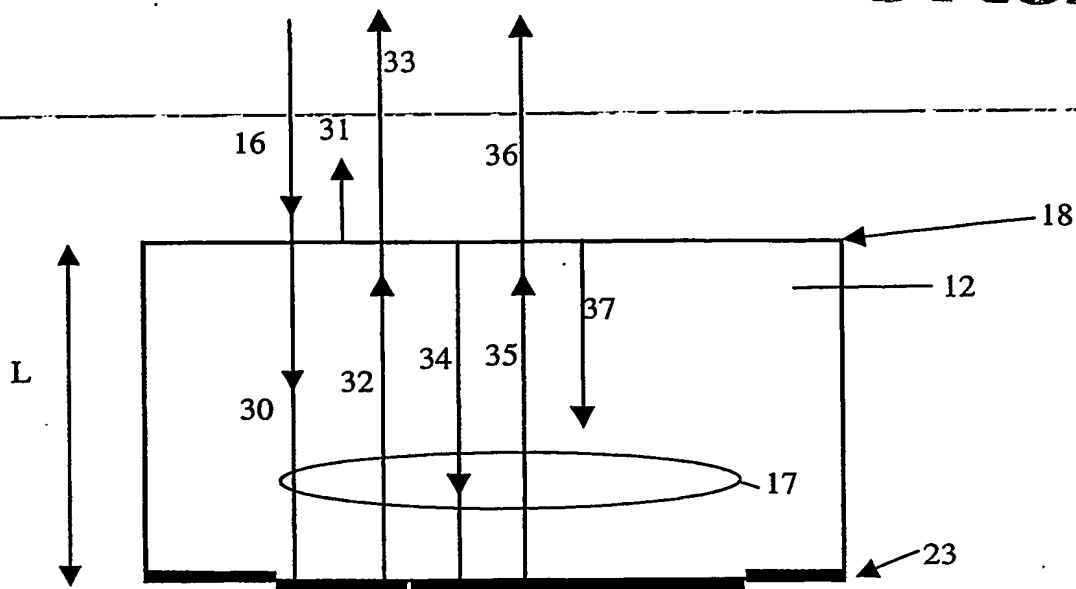
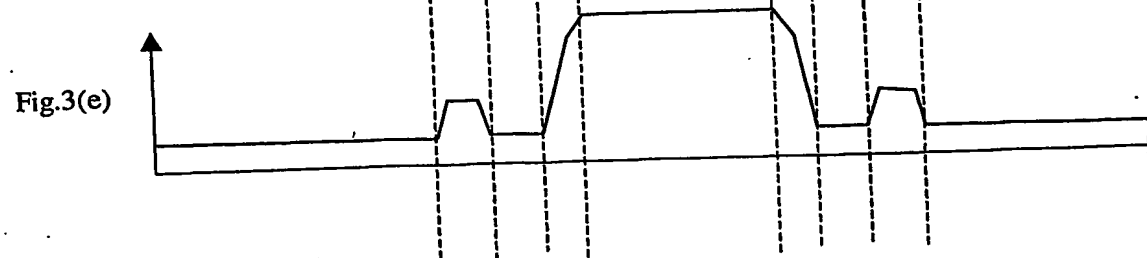
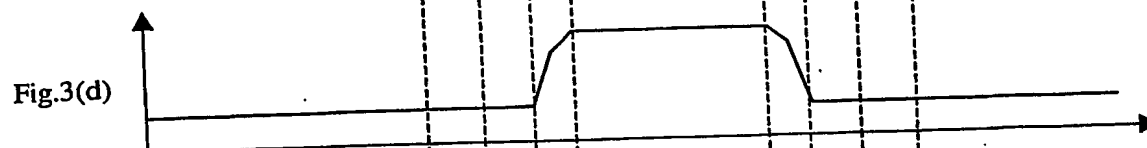
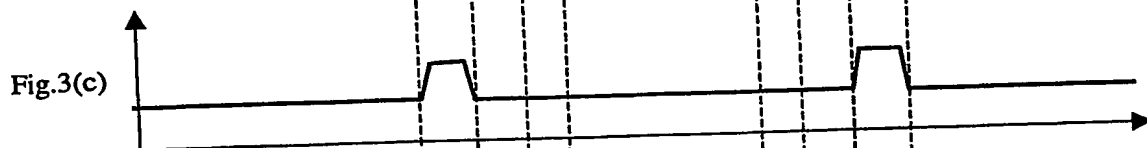
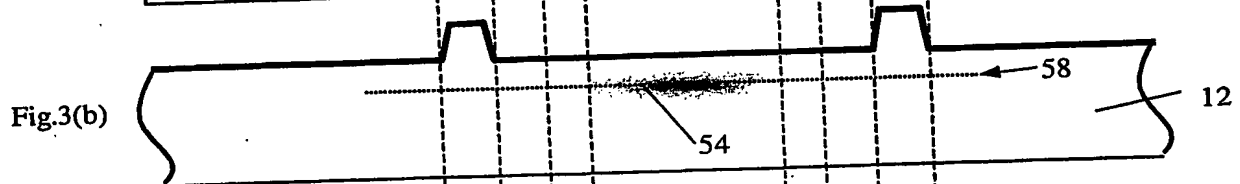
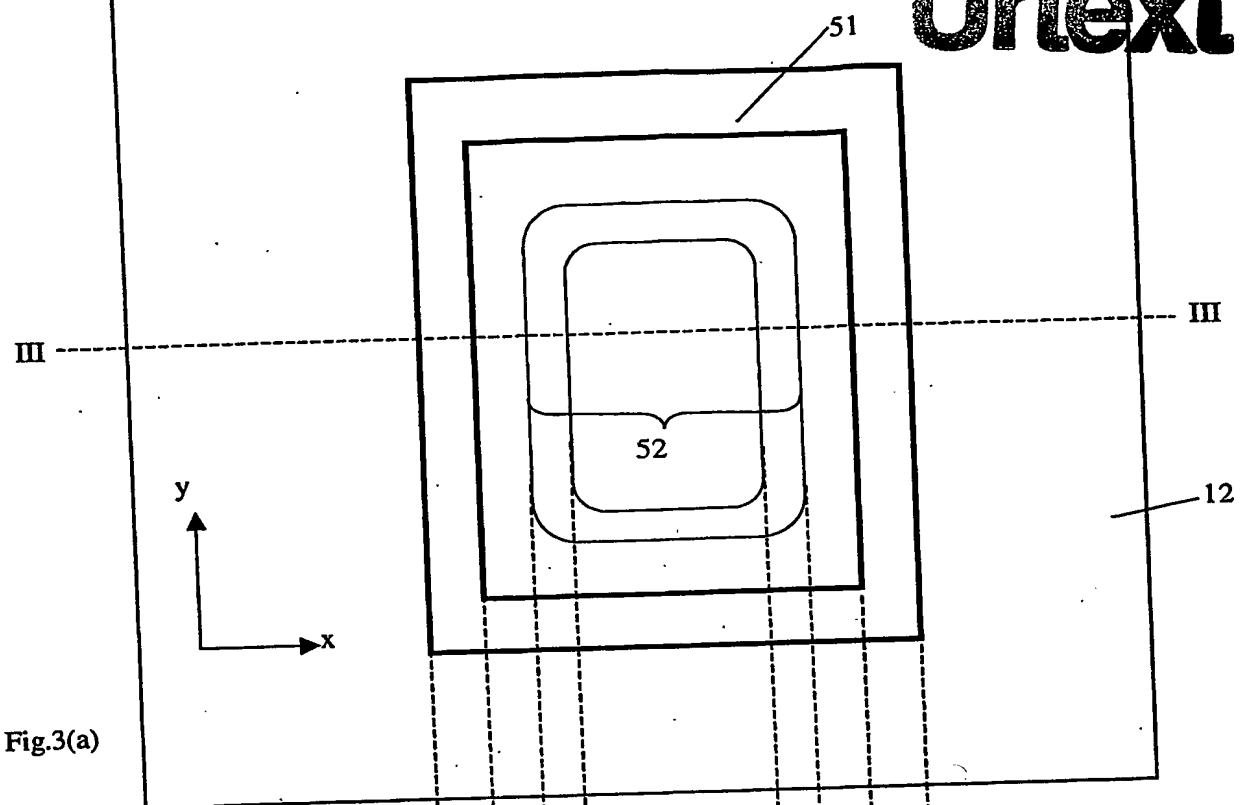


Fig. 2



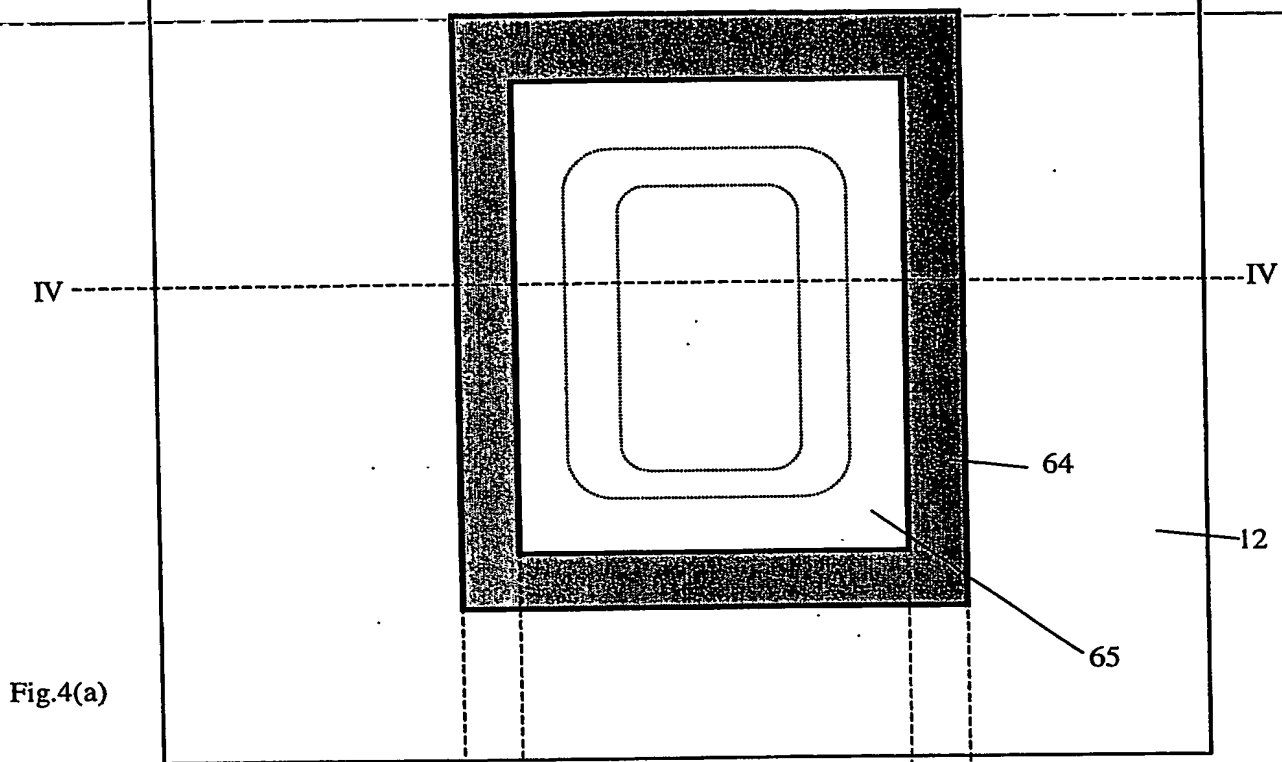


Fig. 4(a)

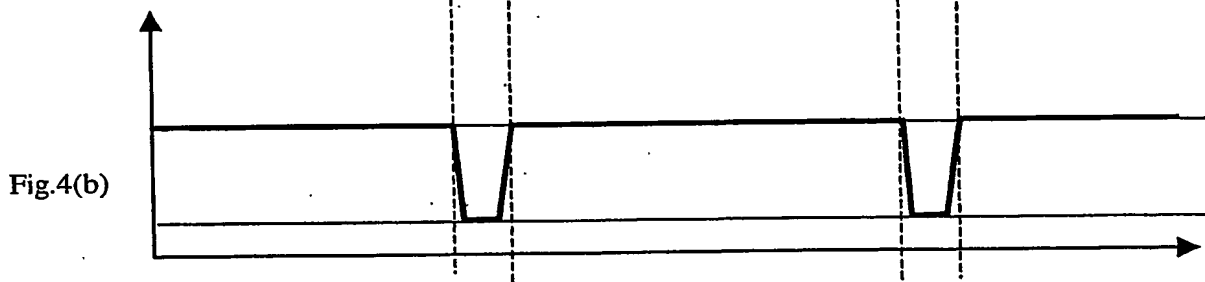


Fig. 4(b)

A 124/2002

02890

Urtext

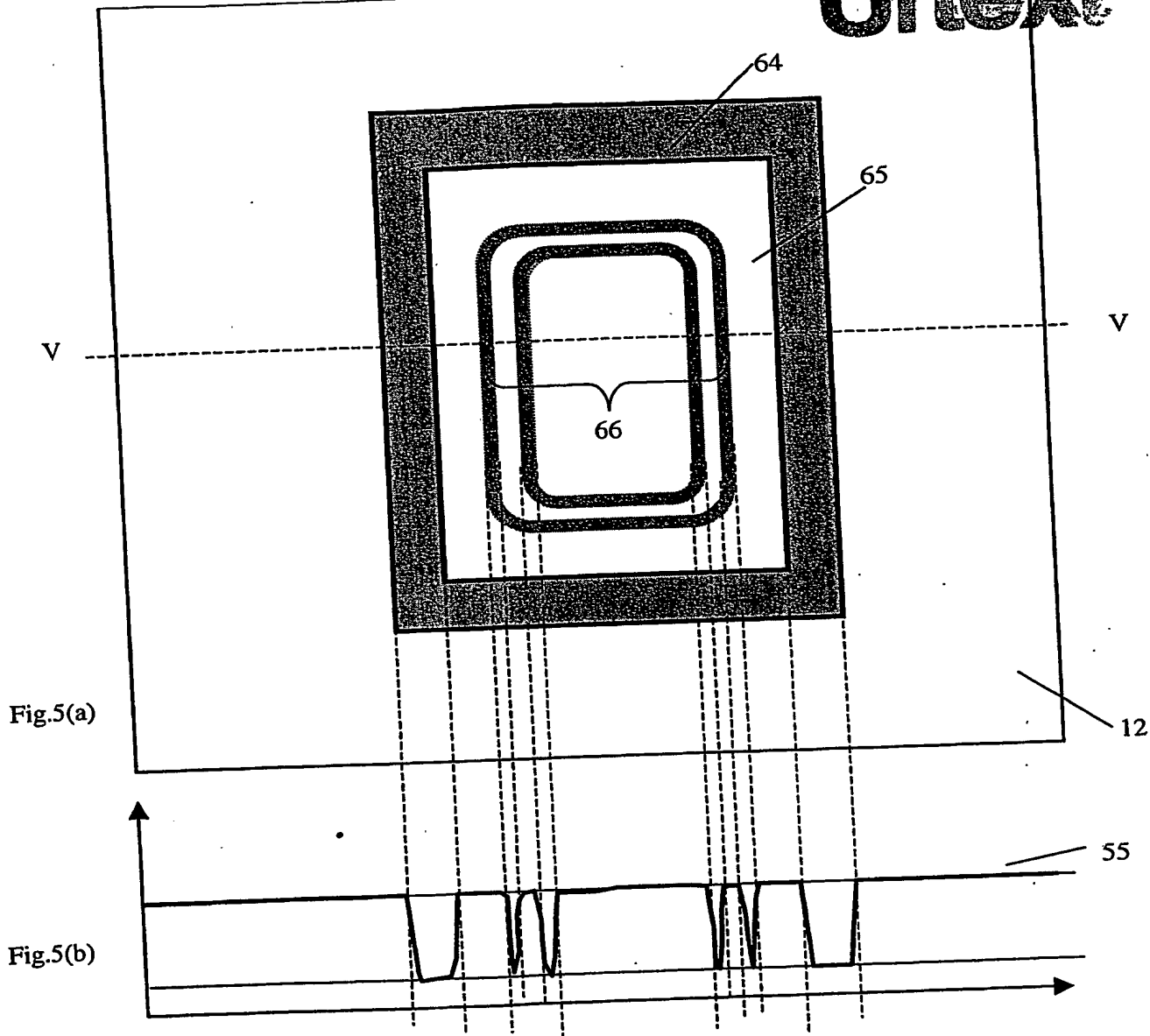
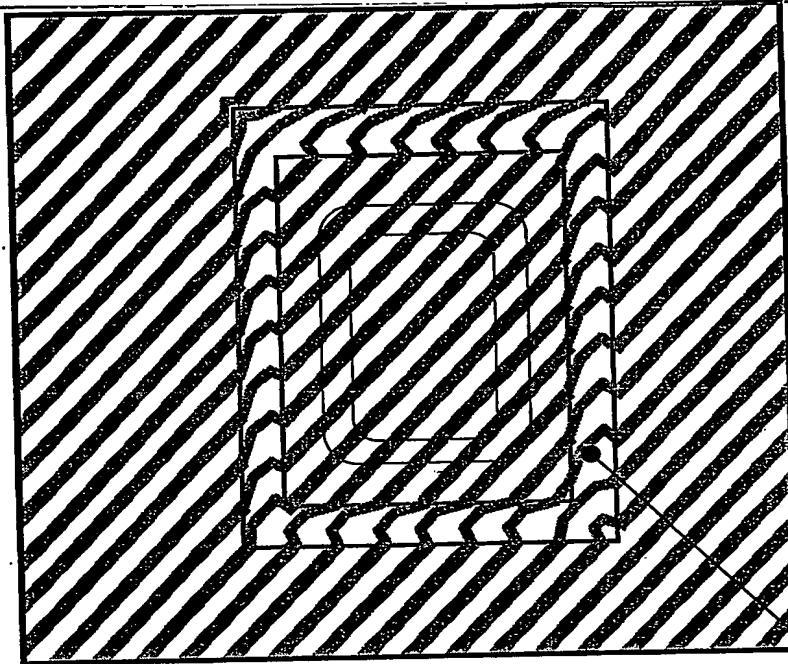
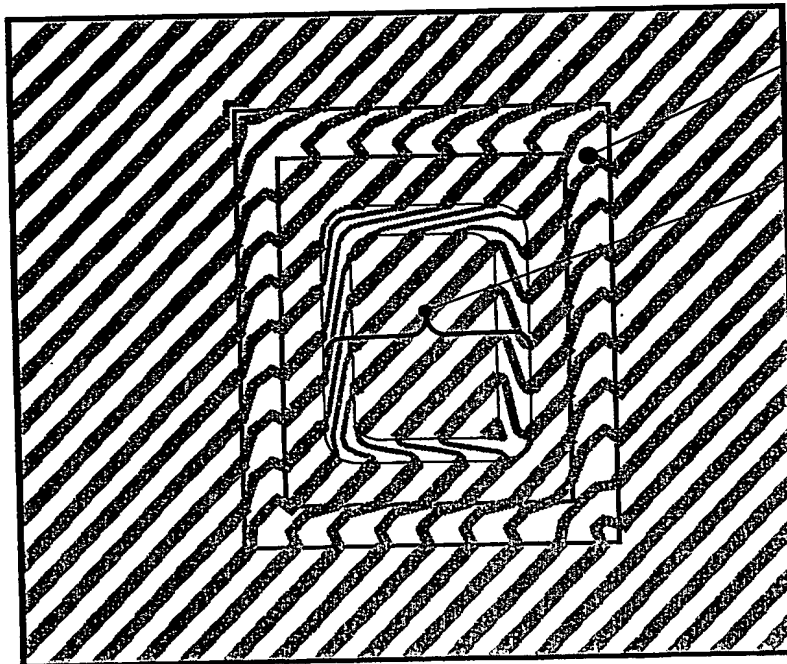


Fig.6(a)



67

Fig.6(b)



68

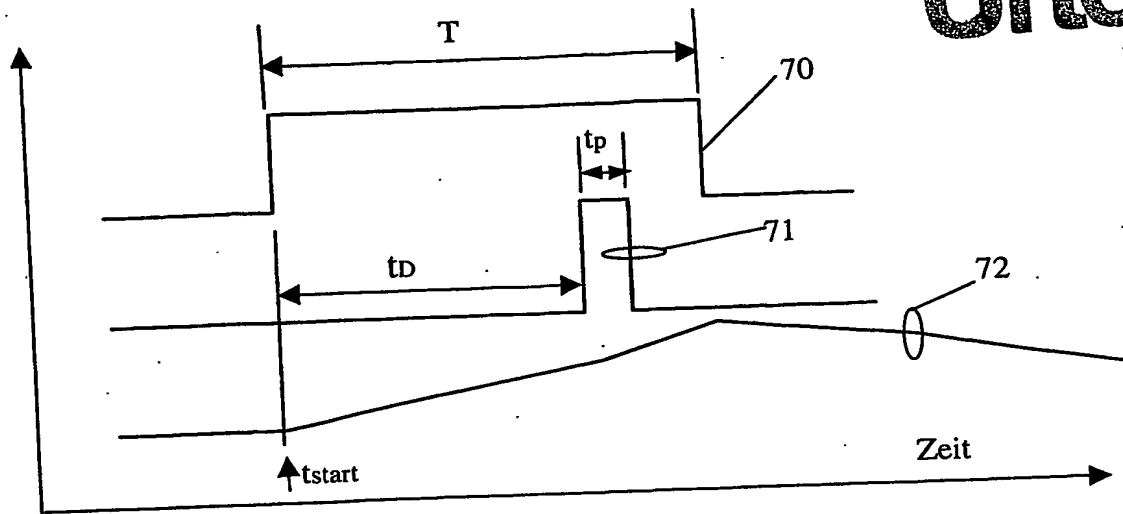


Fig.7

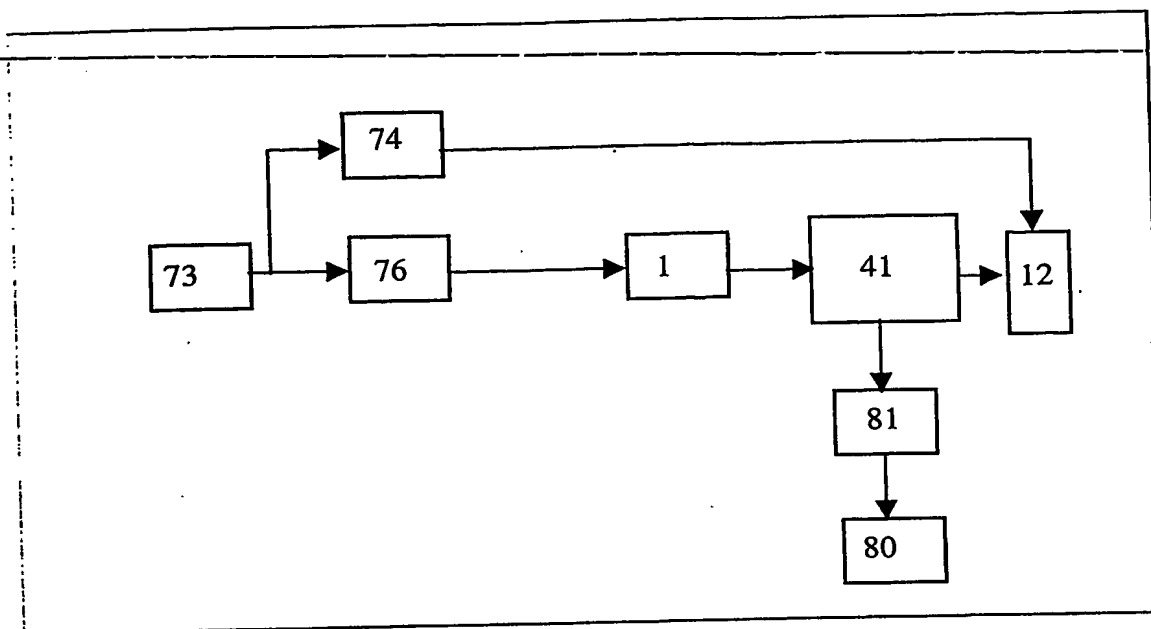


Fig.8



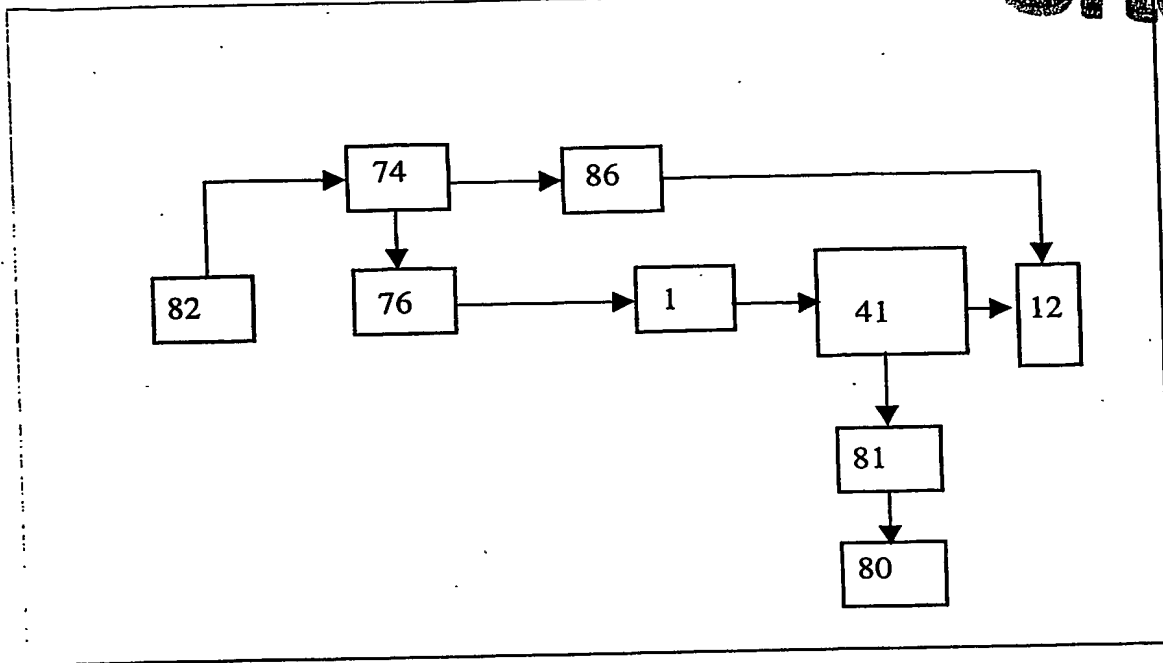


Fig.9

A 124/2002 000000

Urtext

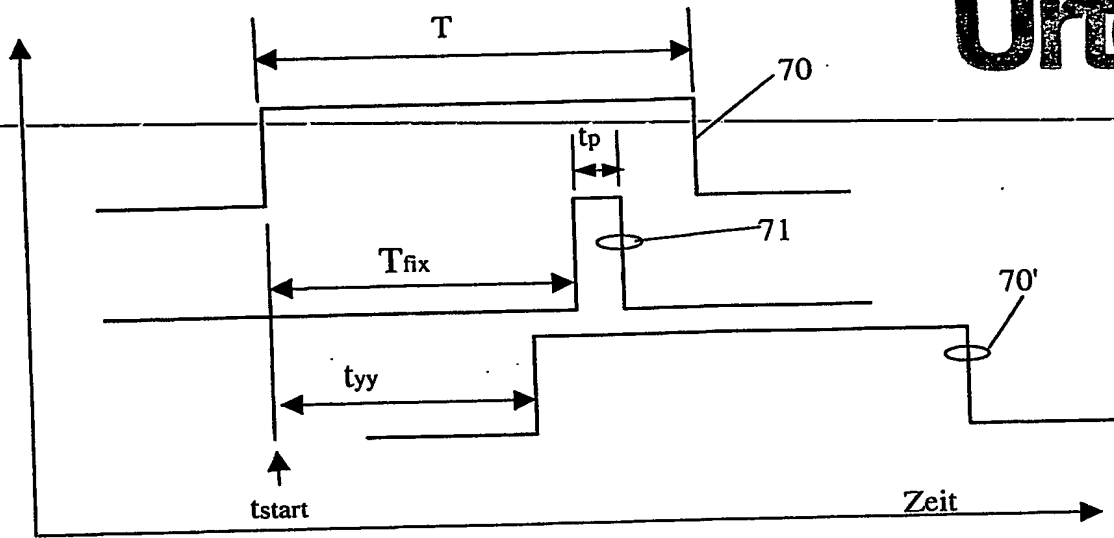


Fig.10

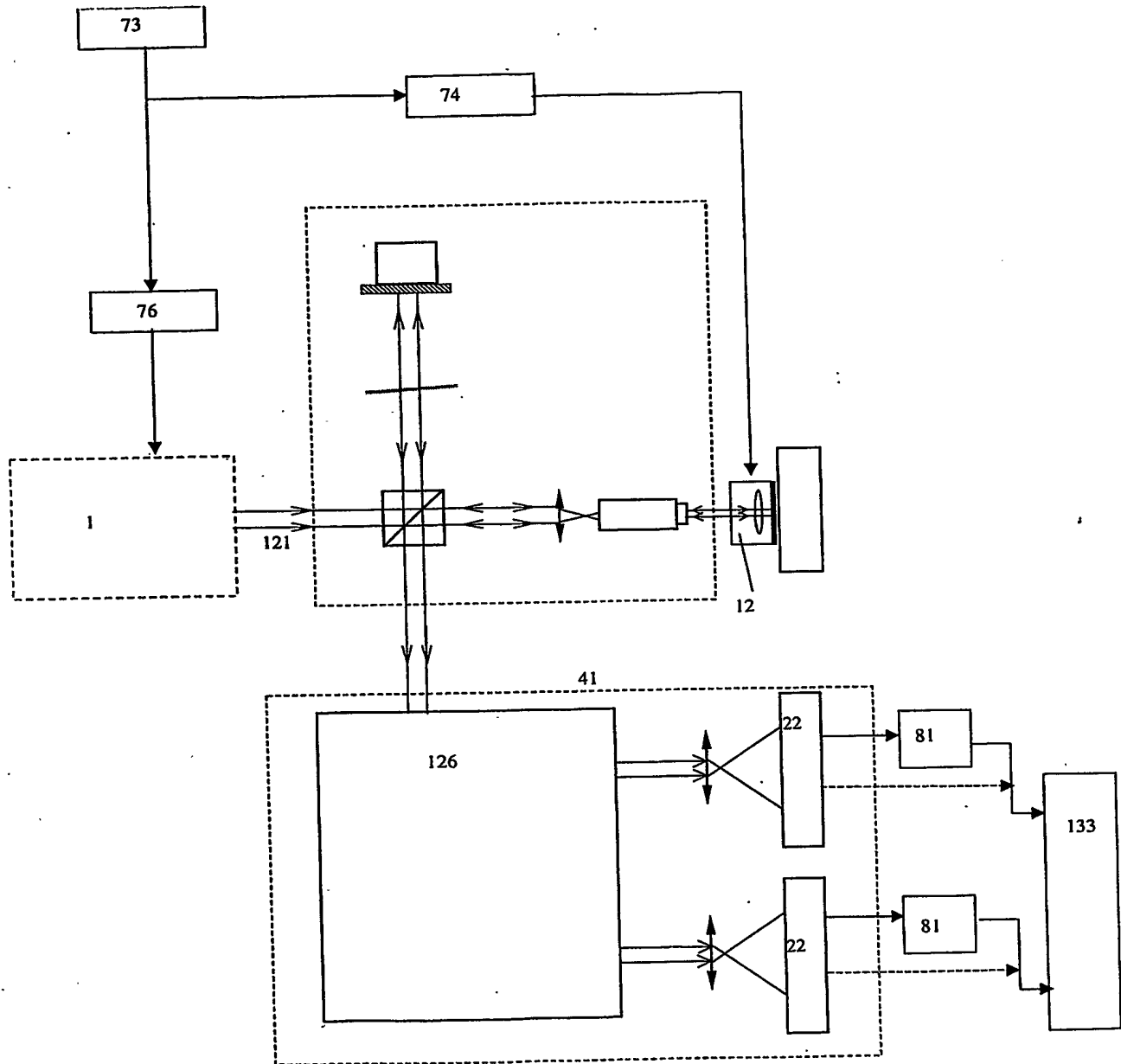


Fig.11

02890

A 124/2002

Urtext

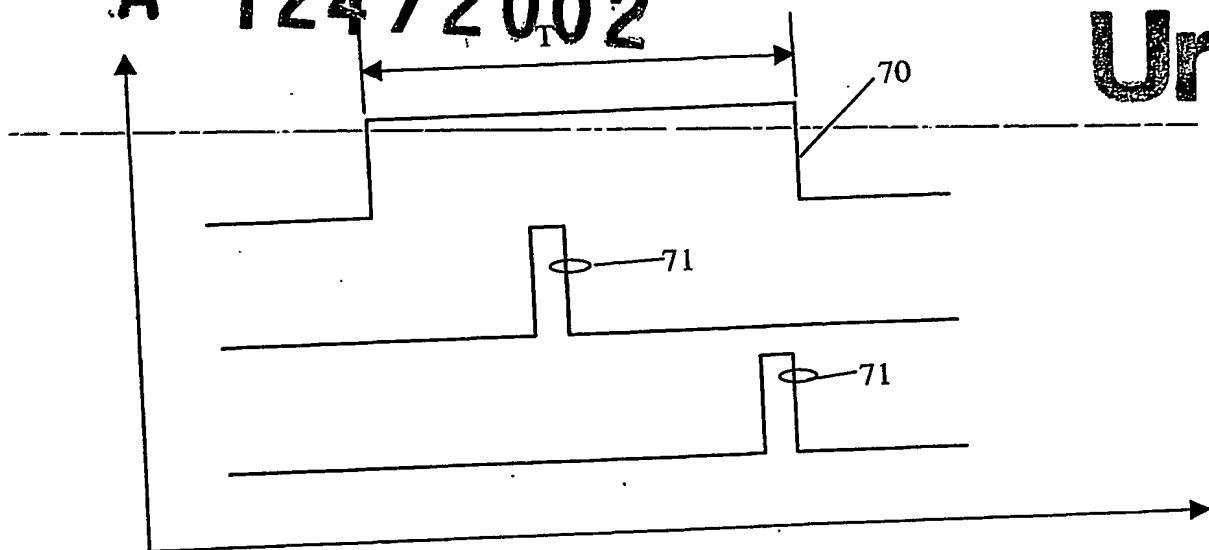


Fig.12

A 124/2002



Urtext

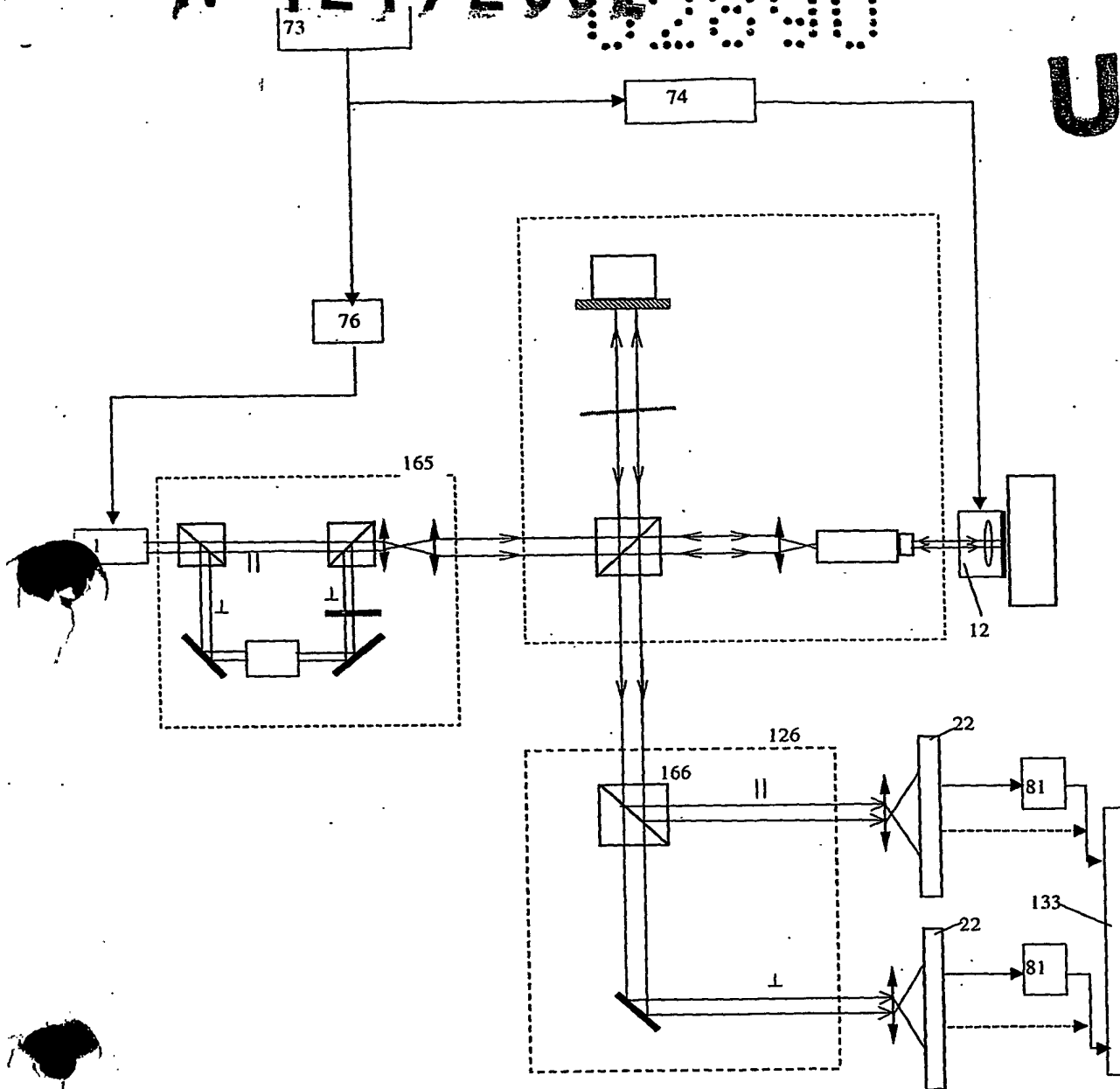


Fig.13

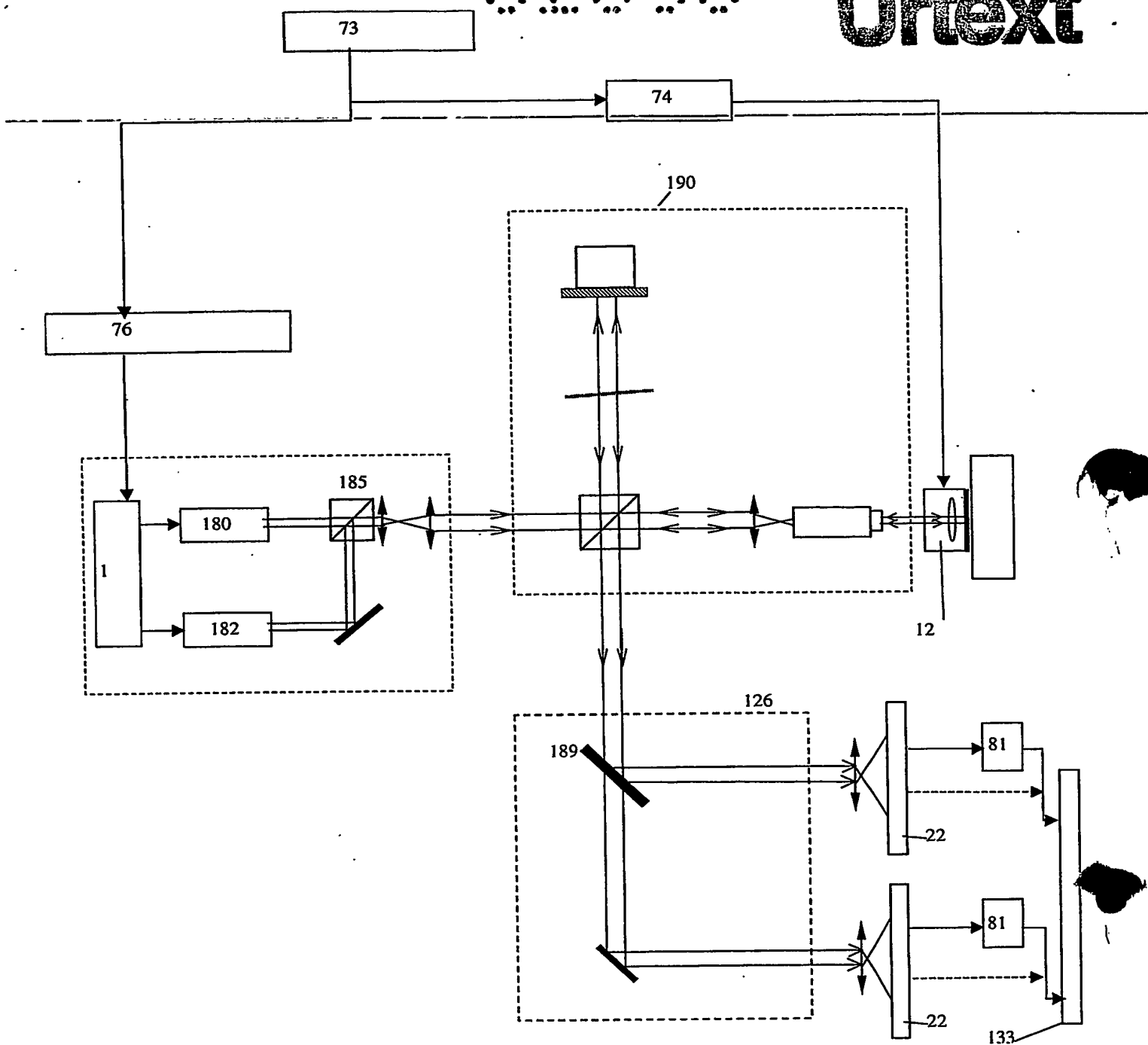


Fig.14

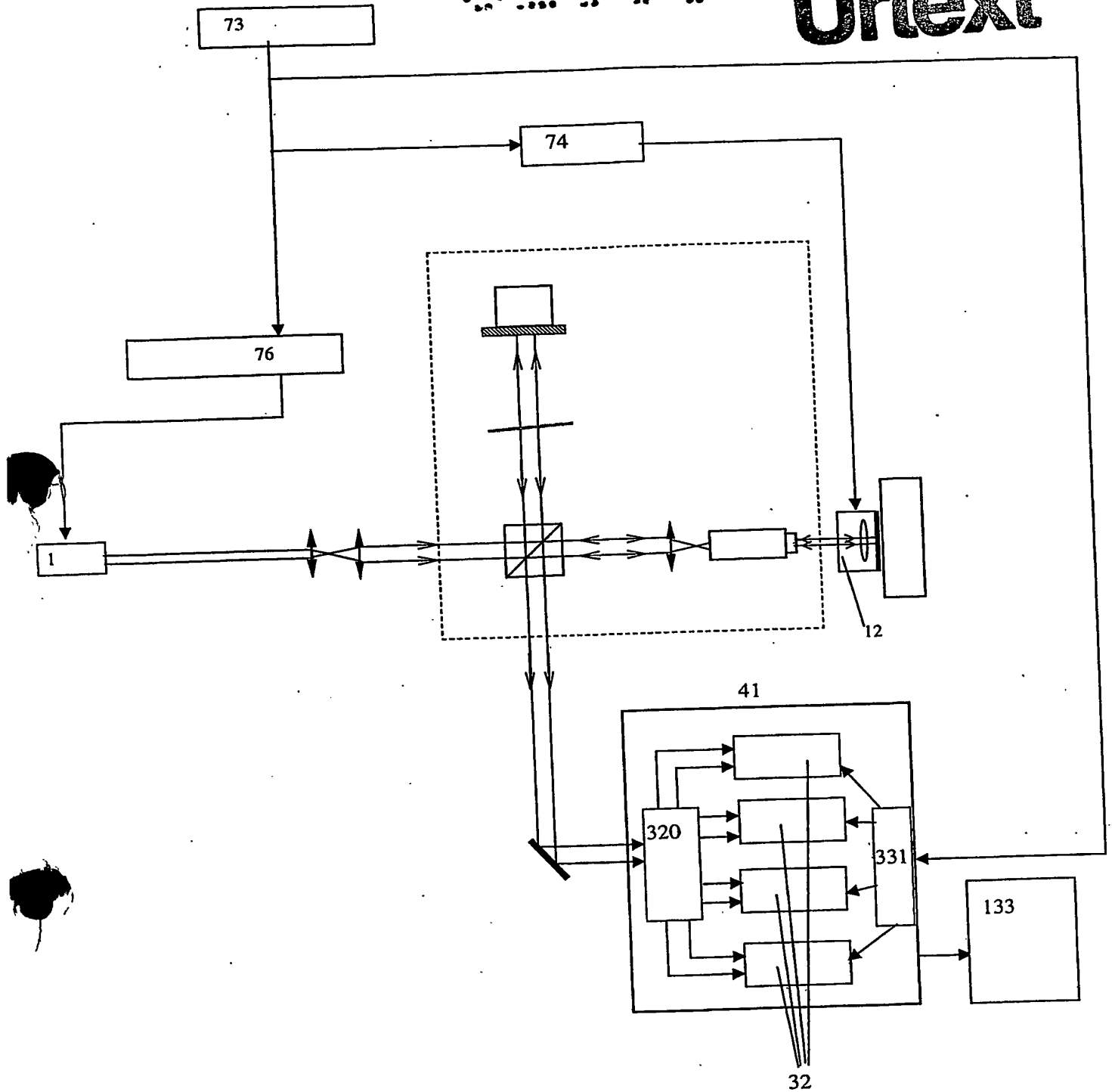


Fig.15

A 124/2002:890

Urtext

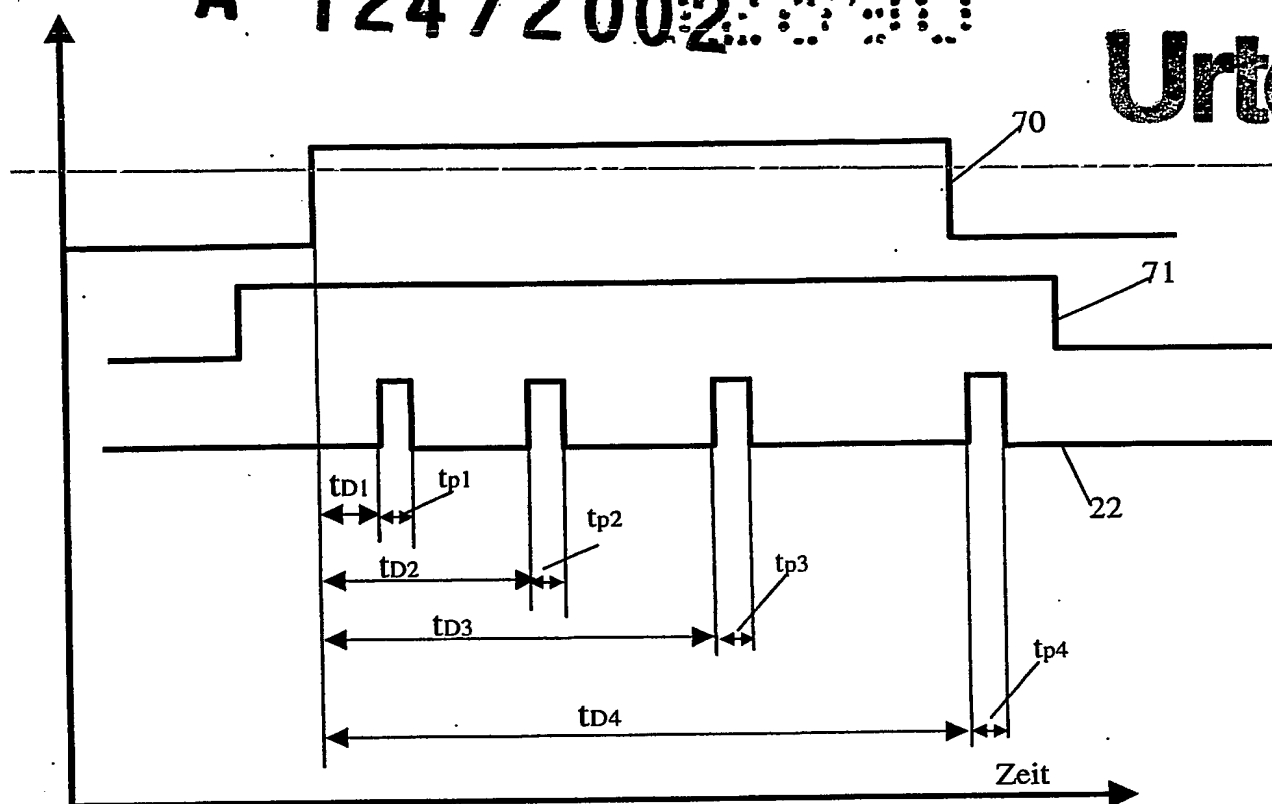


Fig. 16



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**